

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

**Vliv posuvné rychlosti řezné hlavy na hlavní
geometrické parametry povrchu vytvořeného
hydroabrazivním dělením**

**Influence of Cutting Head Feed Speed on Main
Geometric Parameters of Surface Created by
Hydroabrasive Dividing**

Student:

Bc. Jiří KLICH

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Jan VALÍČEK, Ph.D.

Ostrava 2009

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

Jiří KLICH

Poděkování:

Ve své práci si dovoluji poděkovat za cenné připomínky, rady a trpělivost zejména mému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Janu Valíčkovi, Ph.D. Dále děkuji konzultantovi diplomové práce Ing. Robertu Čepovi, Ph.D., Ing. Josefu Foldynovi CSc. a RNDr. Mileně Kušnerové, Ph.D. za cenné rady a důležité informace. Manželce Bc. Dagmar Klichové za morální podporu.

Věnováno dceři Zuzaně.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KLICH, J: Vliv posuvné rychlosti řezné hlavy na hlavní geometrické parametry povrchu vytvořeného hydroabrazivním dělením. Ostrava: katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009, 55 s. Diplomová práce, vedoucí VALÍČEK, J.

Diplomová práce se zabývá komparací drsnosti povrchu dělicích stěn vytvořeného technologií AWJ z hlediska posuvové rychlosti na základě získaných analytických informací z povrchu děleného materiálu pomocí stínové metody. Věnuje se vlivu posuvové rychlosti řezné hlavy na hlavní geometrické parametry povrchu vytvořeného hydroabrazivním dělením a návrhu technologicky optimální posuvové rychlosti pomocí odvozené topografické funkce. Dále je provedena komparace drsnosti povrchu ve vztahu k posuvové rychlosti a hodnoty získané z odvozené topografické funkce jsou porovnány s predikčními hodnotami vypočítanými dle vzorce od autorů Kim a Zeng. Navržený matematický vztah pro výpočet optimální posuvové rychlosti řezné hlavy by měl přispět k automatizaci a tím zvýšit efektivnost technologie AWJ v běžné praxi.

ANNOTATION OF THESIS

KLICH, J: Influence of Cutting Head Feed Speed on Main Geometric Parameters of Surface Created by Hydroabrasive Dividing. Ostrava: Department of Machining and Assembly, Faculty of Engineering, VŠB – Technical University of Ostrava, 2009, 55 p. Thesis, tutor VALÍČEK, J.

This thesis deals with the comparison of surface roughness dividing walls created by the AWJ technology in terms of sliding speed on the basis of analytical information from the surface divided material through the shadow method. It describes the influence of sliding speed cutting head on the main geometric parameters of the surface created by dividing hydroabrasive technology and design the optimal sliding speeds derived using topographical function. It is also made a comparison of surface roughness in relation to the sliding speed and values derived from topographic function are compared with prediction values calculated by relation from the authors Kim and Zeng. The proposed mathematical relation to calculate the optimal sliding speed of cutting head should help to automate and thereby increase the efficiency of AWJ technology in current practice.

OBSAH DIPLOMOVÉ PRÁCE

Seznam použitého značení.....	1
Seznam použitých symbolů	2
1 Úvod.....	4
2 Cíl diplomové práce	5
3 Současný stav technologie AWJ	6
3.1 Vznik nástroje	8
3.1.1 Kapalina	8
3.1.2 Úprava kapaliny.....	8
3.1.3 Komprese	8
3.1.4 Rozvod stlačené kapaliny	9
3.2 Formování nástroje.....	9
3.2.1 Vodní tryska	9
3.2.2 Smíchávání s abrazivem	9
3.2.3 Zaostřovací trubice	10
3.2.4 Abrazivo	11
3.3 Působení nástroje.....	11
3.3.1 Interakce s materiálem	11
3.3.2 Útlum paprsku	12
3.4 Vývojové trendy	12
3.5 Významnost vlivu parametrů AWJ	14
4 Metrologie topografie povrchu	15
4.1 Specifika topografie povrchů vytvořených technologií AWJ	17
4.2 Charakteristika profilu vzorků řezaných AWJ	17
5 Metody pro měření struktury povrchu.....	18
5.1 Mechanické metody.....	18
5.1.1 Kontaktní profilometr HOMMEL TESTER T8000	19
5.2 Optické metody.....	19
5.2.1 Stínová metoda	20
5.2.2 Optický profilometr MicroProf FRT	20
5.3 Jiné metody	21
5.3.1 RTG metoda.....	21
5.3.2 SEM (scanning electron microscopes).....	21

5.3.3	MFM (magnetic force microscopes).....	21
6	Experimentální část	22
6.1	Příprava vzorků	22
6.2	Měření povrchu vzorků	24
6.2.1	Měření vytvořených vzorků AWJ stínovou metodou	24
6.2.2	Měření vytvořených vzorků AWJ optickým profilometrem	26
6.2.3	Měření vytvořených vzorků AWJ kontaktním profilometrem.....	27
6.3	Analýza experimentálních dat ze stínové metody	27
6.4	Vytvoření převodních koeficientů a komparace použitých metod	32
6.5	Komparace drsnosti povrchu vytvořeného technologií AWJ z hlediska posuvové rychlosti	38
6.6	Návrh technologicky optimální posuvové rychlosti	42
6.6.1	Kvantitativní stanovení technologicky optimální rychlosti řezné hlavy	42
6.6.2	Porovnání se současným stavem	47
7	Závěr	50
	Seznam použitých pramenů	51
	Publikace autora související s danou problematikou.....	55

Seznam použitého značení

AWJ - abrazivní vodní paprsek (Abrasive Water Jet)

FFT - rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transform)

MFM - magnetický silový mikroskop (Magnetic Force microscopes)

RTG - radioizotopový termoelektrický generátor (Radioisotope Thermoelectric Generator)

SEM - skenovací elektronový mikroskop (Scanning Electron Microscopes)

WJ - čistý vodní paprsek (Water Jet)

Seznam použitých symbolů

d_a	- průměr usměrňovací trubice	[mm]
d_0	- průměr vodního paprsku	[mm]
h	- tloušťka materiálu	[mm]
h_c	- řezná zóna	[mm]
h_d	- deformační zóna	[mm]
h_{rel}	- relativní hloubka řezu	[mm]
k_1	- převodní koeficient obráběného materiálu	[-]
k_{cuto}	- dělitelnost materiálu	[-]
L	- vzdálenost trysky od povrchu	[mm]
l_p	- délka základní	[mm]
l_a	- délka usměrňovací trubice	[mm]
m_a	- hmotnostní průtok abraziva	[kg·min ⁻¹]
m_v	- průtočné množství vody	[l·min ⁻¹]
N_m	- obrobitelnost materiálu	[-]
p	- tlak	[MPa]
q	- stupeň kvality	[-]
Ra	- střední aritmetická odchylka profilu	[μm]
Ra_0	- drsnost v neutrální rovině	[μm]
Ra_d	- distribuční funkce drsnosti	[μm]
Ra_{rad}	- radiální drsnost	[μm]
Ra_j	- jednotková drsnost	[μm]

RMS	- efektivní hodnota signálu intenzity světla	[a.u.]
Rq	- střední kvadratická odchylka profilu	[μm]
Rz	- největší výška nerovnosti profilu	[μm]
v_p	- rychlost posuvu řezné hlavy	[$mm \cdot min^{-1}$]
z_p	- výška největšího výstupku v rozsahu měřené délky l_p	[μm]
z_v	- hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu měřené délky l_p	[μm]
V_{popt}	- optimální posuvová rychlost	[$mm \cdot min^{-1}$]
V_{pKZ}	- posuvová rychlost od autorů Kim a Zeng	[$mm \cdot min^{-1}$]
E_{mat}	- modul pružnosti v tahu materiálu	[GPa]
Y_{ret}	- zpoždění řezné stopy	[mm]
σ_{pro}	- napětí v neutrální rovině	[MPa]
δ	- deviační úhel	[°]

1 Úvod

Při obrábění obrobku je cílem odstranit přebytečný materiál vysokou rychlostí při zachování přesnosti a kvality nově vytvořeného povrchu. V současnosti je na trhu značné množství konstrukčních materiálů a konvenční technologie úběru materiálu, které se běžně používají v praxi nedostatečně plní svou funkci při dnešní upřednostňované ekonomické a ekologické výrobě. Z těchto a dalších důvodů je několik posledních desetiletí ve vědě, výzkumu i praxi charakterizováno prudkým rozvojem nekonvenčních metod obrábění materiálů, jako je technologie obrábění abrazivním kapalinovým paprskem. Technologie AWJ umožňuje obrábět intenzivně, ekonomicky a přitom ekologicky širokou škálu průmyslových materiálů od papíru, lepenky, dřeva, plastu, korku, stavebních hmot a hornin až po kovy a jejich slitiny. Nedávné pokroky ve zvyšování tlaku učinily AWJ více spolehlivý všestranný a levný nekonvenční nástroj. Hlubší pochopení mechanismu úběru materiálu pomocí hydroabrazivního paprsku slouží k zvýšení jeho výkonu při řezání a rozšíření této metody v běžné praxi. Zatímco technologie vlastního obrábění vysokorychlostním paprskem je již hardwarově do značné míry vyřešena, softwarový vývoj zaostává. Mezi hlavní technologické problémy patří vliv posuvné rychlosti řezné hlavy na geometrické parametry povrchu vytvořeného hydroabrazivním dělením.

Záměrem předkládané diplomové práce je vytvoření návrhu matematické predikce technologicky optimální posuvné rychlosti pro daný materiál pomocí komparace geometrických parametrů řezných stěn vytvořených technologií AWJ, která slouží k odvození korelačních vztahů. Navržené matematické vztahy by měli sloužit k optimalizaci metody dělení materiálu abrazivním kapalinovým paprskem a přispět k její automatizaci s cílem zvýšit efektivnost této technologie.

2 Cíl diplomové práce

Cílem diplomové práce je komparovat dosahované geometrické parametry řezných stěn vytvořených abrazivním vodním paprskem při různých posuvových rychlostech. Výsledky zpracovat a odvodit korelační vztahy k posuvové rychlosti a navrhnout matematickou predikci technologicky optimální posuvné rychlosti pro daný materiál.

K dosažení cíle této diplomové práce je potřeba provést:

1. Literární rešerši.
2. Rozbor současného stavu technologie abrazivního vodního paprsku.
3. Provést dostatečný soubor ověřovacích měření na vzorcích z různých materiálů.
4. Provést matematicko-statistické zpracování dat za účelem odvození způsobu predikce optimální posuvné rychlosti pro různé materiály z hlediska jakosti povrchu.
5. Navrhnout matematickou predikci technologicky optimální posuvné rychlosti řezné hlavy.
6. Realizovat a vyhodnotit potřebná měření pro verifikaci odvozeného predikčního vztahu.
7. Vyhodnotit přínos predikce technologicky optimální rychlosti pro fázi projektové přípravy.

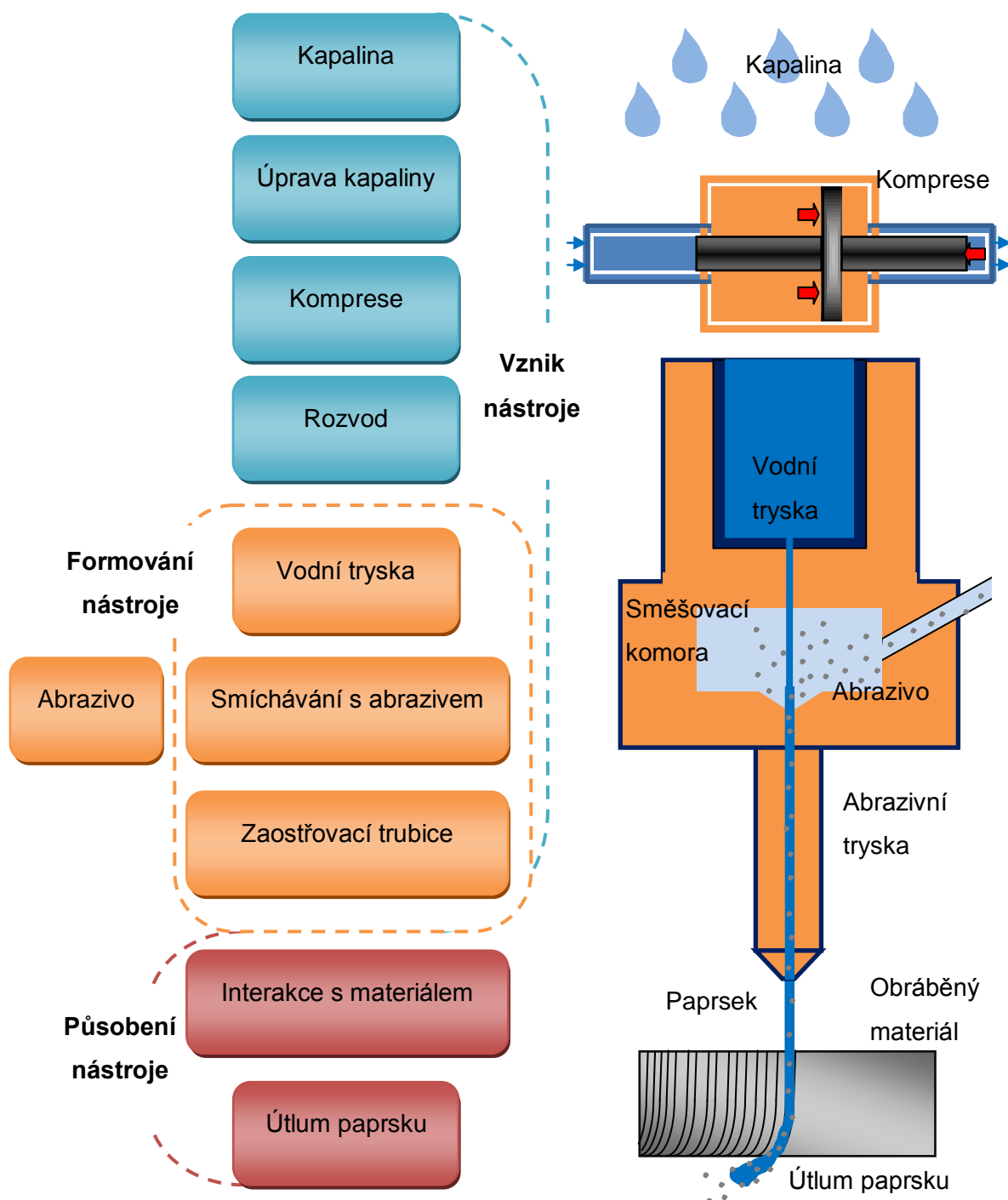
3 Současný stav technologie AWJ

V dnešní době se v praxi nejčastěji setkáváme s dvěma druhy kapalinových parsků. Největší uplatnění na trhu nachází čistý kapalinový paprsek (WJ) a abrazivní kapalinový paprsek (AWJ). V České republice se touto problematikou zabývá např. Oddělení dezintegrace materiálů Ústavu geoniky AV ČR Ostrava, v.v.i., Oddělení kapalinového paprsku Institutu fyziky VŠB-TUO, PTV Hostivice, AWAC Praha, TALPA Ostrava, Aquadem Brno, NET Staré Město pod Sněžníkem a mnoho dalších.

Rozdělení kapalinových paprsků a jejich klasifikace je však daleko rozsáhlejší, viz literatura [10], [24].

U technologie AWJ je hlavní technologickou kapalinou voda, která musí splňovat požadavky na kvalitu. Proto se přivedená voda zbavuje nečistot ve filtrech a případně upravuje její chemické složení. Takto zpracovaná kapalina se přivede do vysokotlakého čerpadla, ve kterém se její tlak zvýší až na 700 MPa. Stlačená voda je přepravována ve vysokotlakém potrubí do kompenzátoru (rezonátoru), kde se vyruší tlakové vlny způsobené čerpadlem. V další fázi se kapalina přivádí k polohovacímu zařízení, na kterém je připevněna řezná hlavice. V první části řezné hlavice se vytvoří ve vodní trysce paprsek o vysoké rychlosti. Ten prochází komorou, do které je samostatným potrubím přiváděno abrazivo z dávkovače a zásobníku. Přimícháváním abrazivních částic do vysokotlakého proudu vody rychle vzroste výkon řezání. Abrazivo je strháváno vodou, která mu odevzdá část hybnosti. Následně se formuje abrazivní paprsek v abrazivní trysce. Při výstupu z trysky má již abrazivo potřebnou kinetickou energii pro řezání materiálu, který je umístěn několik milimetrů pod tryskou. Při řezání materiálu dochází k útlumu řezné síly paprsku. Zbytková energie je zachytávána v nádrži s vodou tvořící pracovní plochu stroje. Nádrž je přibližně 1 metr hluboká a na jejím dně můžou být umístěny předměty různých tvarů, které rozptylují zbylou energii paprsku. Kalná voda z nádrže se odčerpává do odkalovací kaskády, kde se odděluje voda od pevných látek. Takto upravená voda se může zase použít. Usazený kal složený z abraziva a odebraného materiálu se odváží jako odpad nebo se abrazivo přefiltruje a použije při dalším řezání. Recyklované abrazivo má nižší účinnost při řezném procesu.

Charakteristika technologie AWJ, její hlavní oblasti procesu vzniku, formování a působení nástroje na obráběný materiál vidíme na obr. 3.1.



Obrázek 3.1 - Schéma technologického systému AWJ

Jednotlivé technologické etapy vzniku, formování a působení AWJ na obráběný materiál jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách.

3.1 Vznik nástroje

3.1.1 Kapalina

Pracovní kapalina pro AWJ musí splňovat následující požadavky [19]:

- nízkou viskozitu zabezpečující malé ztráty výkonu toku kapaliny při průchodu potrubím, hadicemi a tryskou
- minimální ovlivnění kovových částí zařízení korozí,
- běžnou přístupnost a nízkou cenu,
- schopnost zabezpečit maximální produktivitu,
- schopnost zabezpečovat nejlepší jakost obrábění při nejmenších energetických ztrátách na formování paprsku.

Mnohé z výše uvedených požadavků jsou protichůdné a při konkrétních aplikacích se mohou vzájemně vylučovat. Avšak z globálního pohledu uvedené požadavky nejlépe splňuje voda, která je nejdostupnější, nejlevnější a je ekologická [19].

3.1.2 Úprava kapaliny

Mechanická úprava vody – filtrace slouží k odstranění pevných částic různých velikostí z vody. Správná filtrace vstupní kapaliny snižuje opotřebení všech částí zařízení (stěny trubek, stěny válců) a prodlužuje dobu bezporuchového chodu zařízení. Kromě filtrace se úprava vody provádí změkčováním, deionizací a zpětnou osmózou.

3.1.3 Komprese

Vysokotlaká čerpadla slouží k vyvození vysokého tlaku kapalinového paprsku pomocí systému hydraulických pump. Jejich úlohou je plynulé generování tlaku kapaliny s konstantní efektivní hodnotou. V rámci technologie se používají dva

druhy zařízení generujících vysokotlaký vodní paprsek. Je to zařízení s multiplikátorem a plunžrovým čerpadlem. Jejich použití v systémech je podmíněné hodnotou výstupního tlaku vody [19], [28].

3.1.4 Rozvod stlačené kapaliny

Stlačená kapalina je přivedena přes vysokotlaké potrubí do pohybujícího se zařízení řezné hlavy. Běžné pracovní tlaky vyráběných armatur a kapilár jsou do 1000 MPa. Na výrobu vysokotlakých potrubí a armatur se nejčastěji používají vysokopevnostní, nejčastěji nerezové oceli. Pro nižší tlaky se užívají hadice.

3.2 Formování nástroje

3.2.1 Vodní tryska

Vodní tryska je základní součást zařízení a je umístěna na vstupu do řezné hlavy. Vytváří a formuje vysokorychlostní proud kapaliny, ovlivňuje kvalitu a produktivitu dělení, čímž má zásadní vliv na celkovou účinnost nástroje. Vodní trysky se využívají v obou typech nejčastěji používaných nekonvečních technologií dělení kapalinovým parskem a to v AWJ i WJ. Různé druhy vodních trysek používaných pro generování vysokorychlostního vodního paprsku umožňuje vhodnou volbu trysky s využitím různé energie proudu a vzniká možnost z jednoho tlakového zdroje napájet současně i více trysek na dělení materiálů. Materiál použitý při výrobě vodní trysky závisí především na požadovaném tlaku. Trysky pro tlaky do cca 150 MPa se vyrábějí z nerezavějící oceli, trysky pro tlaky do 250 MPa z tvrdokovů nebo keramiky a trysky pro tlaky vyšší než 250 MPa ze safíru, rubínu nebo umělého diamantu [28].

3.2.2 Smíchávání s abrazivem

Ve směšovací komoře, umístěné v řezné hlavě, dochází k přimíchávání abrazivního materiálu do čistého vysokorychlostního vodního paprsku. V důsledku vysoké rychlosti vstupujícího vodního paprsku do komory specifického tvaru a velikosti, dochází ke vzniku podtlaku, kterým je přisáváno abrazivo ze zásobníku do

komory, kde se mísí s paprskem. Zde jsou abrazivní částice vysokotlakým paprskem urychlovány a hnány po průchodu zaostřovací trubice společně vytvářejí abrazivní kapalinový paprsek.

3.2.3 Zaostřovací trubice

Průměr a délka zaostřovací trubice určují vlastnosti vystupujícího abrazivního paprsku. V aplikacích přesného dělení se nejčastěji používají zaostřovací trubice o průměru 0,8 až 1,2 mm a délce 75 až 125 mm.

Základním požadavkem na směšovací trubici, ve které probíhá proces formování konečného tvaru nástroje-paprsku, je vysoká míra otěruvzdornosti. I přes velkou materiálovou odolnost trubice dochází postupně vlivem neustále proudící vysokoerozivní směsi k jejímu opotřebení. Výrobci udávaná životnost směšovacích trubic z různých materiálů je uvedena v tab. 3.1.

Tabulka 3.1 - Životnost směšovacích trubic [18], [35]

Materiál	Životnost [hod]	Popis
Standardní karbid wolframu	4 - 6	Původní směšovací trubice. Nízká výkonnost a poměr cena/hodina. Mají sklon k mimoosovému opotřebování, požadují velmi častou výměnu.
Levný kompozitní karbid	35 - 60	Vhodné pro hrubé dělení materiálů nebo pro zaučování nového operátora.
Střední životnost kompozitní karbid	80 - 90	Vhodné pro všechny aplikace dělení materiálů.
Premium kompozitní karbid	100 - 150	Nejlepší vlastnosti vykazuje souosé a předvídatelné opotřebení. Užívá se pro přesné řezání i každodenní práce.

3.2.4 Abrazivo

Volba vhodného druhu abraziva je velmi významná, jelikož náklady na abrazivo nám představují největší položku při dělení materiálů pomocí technologie AWJ. Při výběru abraziva musíme vždy volit kompromis mezi těmito faktory:

- Tvrdost abraziva
- Velikost abrazivních zrn
- Tvar abrazivních zrn
- Hmotnostní tok abraziva
- Ekologičnost abraziva
- Cena abraziva.

Jako abrazivum se používá především granát, korund, skleněné perly, ocelové broky, ocelový písek, litinový písek, ocelové kuličky. Čím tvrdší jsou tato tělíska, o to lépe probíhá odebírání materiálu. Výše uvedené faktory splňují v současné době nejčastěji používaná abraziva na bázi granátového nebo olivínového písku, případně strusky [21].

3.3 Působení nástroje

3.3.1 Interakce s materiálem

Při kontaktu s obráběným materiálem začíná abrazivní paprsek ztrácet kinetickou energii a vychyluje se. Mechanismus úběru materiálu můžeme rozdělit na zavrtávání, řezání, plastickou deformaci, únavu a lom. Tyto mechanismy však nepůsobí jednotlivě, ale v různých kombinacích [8], [9], [10], [12], [19], [24], [28], [33]. Výsledkem působení těchto dílčích mechanismů vzniká povrch jako na obr. 3.2, který je charakteristický tím, že horní část dělicího řezu je poměrně hladká a od určité hloubky převládá rýhovaná oblast.



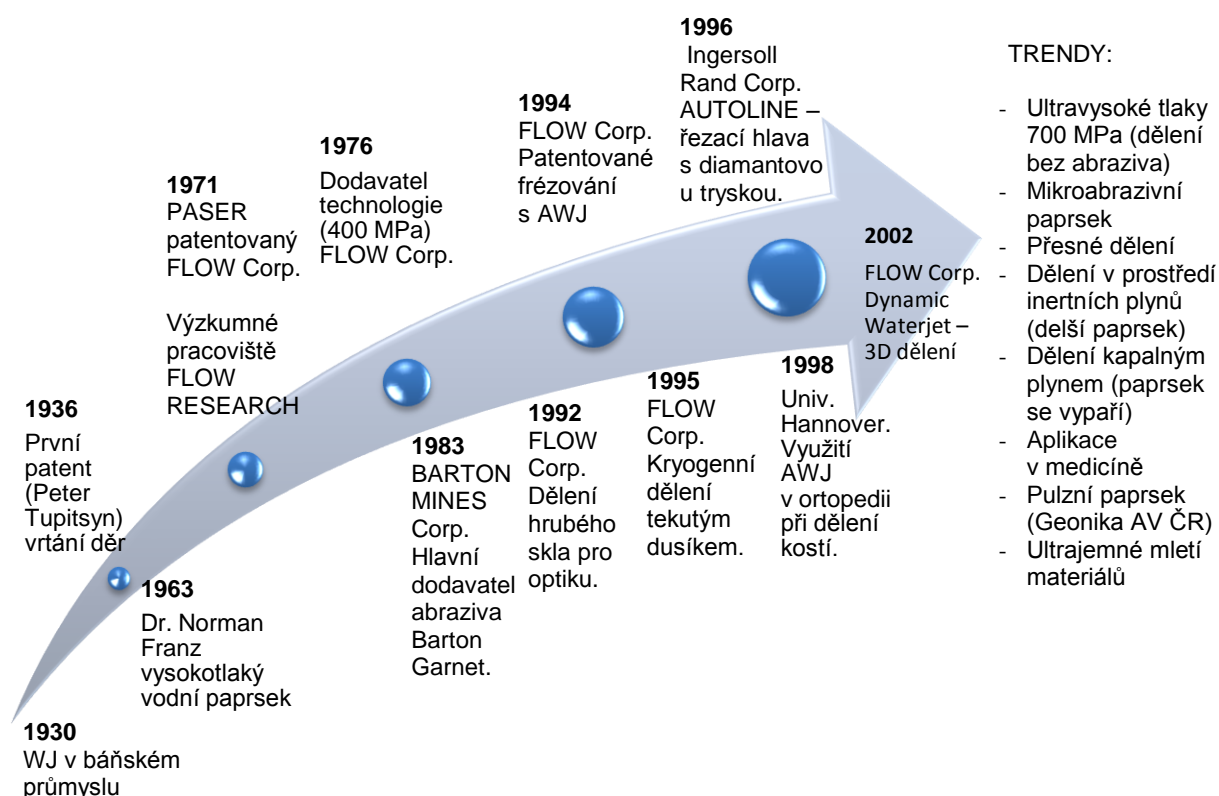
Obrázek 3.2 - Rozdělení dělicího řezu na dvě zóny h_c a h_d podle Hashishe [9] na materiálu ČSN 17 251, který byl vytvořen AWJ za konstantních technologických podmínek uvedených v tab. 6.1 a za posuvné rychlosti řezné hlavy $v_p = 200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

3.3.2 Útlum paprsku

Zachytávání paprsku probíhá v prostoru záchytné nádrže, ve kterých se paprsek rozptýlí a ztratí svoji kinetickou energii. Vana je nejčastěji naplněná vodou, minimální výška hladiny by měla být 0,5 m. Tato výška se určuje na základě hodnoty používaného pracovního tlaku kapaliny. Pro zlepšení účinnosti tlumení paprsku se do prostoru záchytné nádrže přidávají keramické materiály ve tvaru jehlanu, koule, apod.

3.4 Vývojové trendy

V současnosti je známých víc než 50 tisíc konstrukčních materiálů. Velké množství materiálů bylo vyrobeno a navrženo za účelem splnění požadovaných technologických vlastností. Konvenční metody obrábění u těchto materiálů jsou značně neekonomické a často úplně selhávají. Z těchto důvodů bylo potřeba vyvíjet nové nekonvenční technologie obrábění, které se přizpůsobí trendu vývoje nových materiálů, jako je technologie AWJ. Od prvních aplikací (obr. 3.3) technologie vysokorychlostního kapalinového paprsku se tato technologie v posledních dvou dekádách vyvíjí a zdokonaluje konstantně [14]



Obrázek 3.3 – Vývoj technologie vysokorychlostního hydroabrazivního proudu [14]

Pro chlazení místa řezu je tato technologie vhodná na dělení materiálů s dobrou tepelnou vodivostí: měď, hliník a kompozitní materiály, jako jsou např. měď-ocel-měď, grafit-nerez ocel-grafit, plast-hliník-plast. Dělení AWJ se používá i pro poddajné materiály a tím těžkoobrobitelné materiály, jako je guma, polyuretan, molitan, rohože a všechny druhy materiálu pro výrobu těsnění. Nakolik je technologie dělení materiálů AWJ bezprašnou technologií, umožňuje dělit i materiály, při dělení kterých dochází mechanickým způsobem k uvolňování prachových, karcinogenních či jiných jedovatých látek do ovzduší. Výhodou technologie AWJ je její univerzálnost spočívající kromě dělení libovolných materiálů i v tom, že pro jejich dělení se nevyžadují různé nástroje. Ztráta materiálu je od 0,3 mm při dělení tenkých a měkkých materiálů až do 3 mm při dělení hrubých materiálů [14].

3.5 Významnost vlivu parametrů AWJ

Dělení materiálů pomocí vysokorychlostního hydroabrazivního paprsku je složitý hydrodynamický proces. Aby tento proces byl ekonomicky efektivní a s nejmenšími energetickými ztrátami, je nezbytné určit hlavní parametry a jejich vliv na danou technologii. Na základě výsledků analýzy autorů [12], [19], [27], [28] je sestavena tabulka významnosti vlivu jednotlivých nejdůležitějších parametrů AWJ na obrábění a na jakost dělicích stěn.

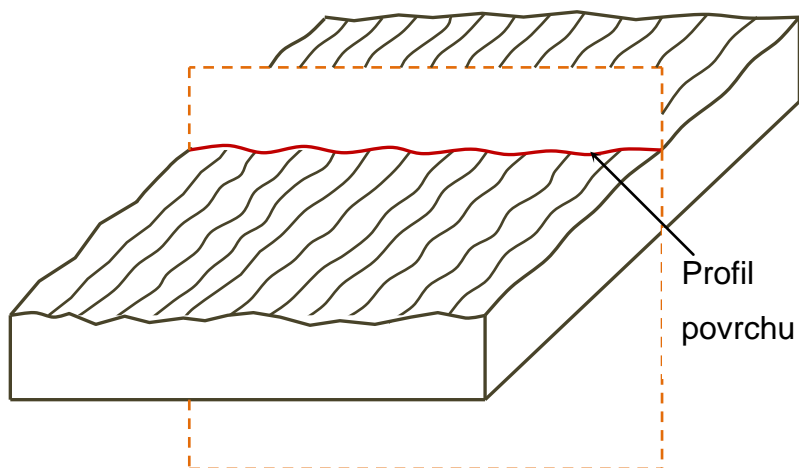
Tabulka 3.2 - Významnost vlivu technologických parametrů AWJ na výkon a jakost dělení materiálů

	Parametry AWJ							
	p [Pa]	d_o [m]	d_a [m]	l_a [m]	m_a [kg·s ⁻¹]	zrnitost [mesh]	mat. abr.	v_p [m·s ⁻¹]
objem odebraného materiálu	3	3	2	1	3	2	2	3
hloubka dělicího řezu	3	3	2		3	2	2	3
opotřebení abrazivní trysky	2	2	2	1	2	2	3	
provozní náklady	3	1	1	1	2	2		2
vlnitost povrchu	2	2	1	1	2	1	1	2
drsnost povrchu	2	2			1	3	2	2
fragmentace částic	2	1	1	1	1	1	3	
účinnost promíchání	1	2	2	1	2	1		
šířka dělicího řezu	1		3		1			
cena zařízení	3	1						1
spolehlivost práce	2	1					1	1
Ekologie	1	1					2	
rozšíření paprsku	1	2						
koeficient proudění	1	2						
hydraulická účinnost	1	2						
koherence paprsku				1	1			
tepelné ovlivňování	1					1		
zpevnění materiálu	1		1					

Legenda: 1 - malá významnost, 2 - velká významnost, 3 - maximální významnost.

4 Metrologie topografie povrchu

Každá technologická metoda při obrábění zanechává na povrchu nerovnosti, které mají zásadní význam pro funkci povrchu technologických ploch. Nerovnosti na povrchu představují prostorový útvar, který lze řešit redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu (obr. 1.1). V rovině řezu se získá profil, který je základním zdrojem informace pro posuzování struktury povrchu [27].



Obrázek 5.1 - Profil nerovnosti povrchu [27]

K objasňování mechanismu vytváření drsnosti povrchu nám slouží odpovídající ukazatele jakosti. Vytváření profilu povrchu je závislé na vlastnostech použitého materiálu, pracovních podmínkách, na nástrojích, obráběcích strojích a dalších konstrukčních i technologických parametrech. Topografie povrchu je členěna na složky podle rozteče příslušných nerovností. Jedná se o složku s nejmenší roztečí tvořící drsnost povrchu, složku nazvanou vlnitost povrchu a složku s největší roztečí nerovností neboli základní profil. Bližší prostudování a definování vztahů mezi drsností povrchu, funkčními ukazateli a technologickými činiteli je předpokladem pro možné vědecké ovlivňování parametrů jakosti.

Požadavky na drsnost povrchu se vyjadřují charakteristikou (veličinou) drsnosti povrchu buď jednou, nebo několika veličinami podle stávajících norem, číselnou hodnotou příslušné veličiny a základní délkou, na které se veličina určuje.

Normované charakteristiky drsnosti povrchu, které užívám v následujících postupech, jsou:

R_a – střední aritmetická úchylka profilu,

R_q – střední kvadratická úchylka profilu,

R_z – největší výška nerovností profilu.

Tyto charakteristiky definujeme:

Střední aritmetická úchylka profilu R_a je přednostní výškovou charakteristikou drsnosti povrchu. Je to střední aritmetická hodnota absolutních úchylek profilu od vztažené roviny v rozsahu základní délky

$$R_a = \frac{l}{l_p} \int_0^{l_p} |y(x)| dx \quad \text{nebo} \quad R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y(x_i)|, \quad (1)$$

kde je: l_p - měřená délka, [m]

$y(x)$ - funkce popisující profil, [-]

$y(x_i)$ - souřadnice n bodů profilu povrchu v mezích

měřené délky, $i = 1, 2, 3 \dots n \dots$ [-]

Střední kvadratická úchylka profilu R_q je kvadratickou analogií parametru R_a a reflektuje jeho časově-prostorový průběh a současně má přímý vztah k jeho energetickému obsahu a je tedy i měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti nerovností povrchu. Je definována zápisem:

$$R_q = \sqrt{\frac{l}{l_p} \int_0^{l_p} y^2(x) dx} \quad \text{nebo} \quad R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2(x_i)} \quad (2)$$

Největší výška nerovnosti profilu R_z je výšková charakteristika drsnosti povrchu, určená vzdáleností mezi čarou výstupků profilu a čarou prohlubní profilu v rozsahu základní délky [11].

$$R_z = Z_p + Z_v \quad (3)$$

kde: Z_p - výška největšího výstupku v rozsahu měřené délky l_p [μm]

Z_v - hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu měřené délky l_p [μm]

4.1 Specifika topografie povrchů vytvořených technologií AWJ

Nerovnost povrchů vytvářených klasickým obráběním nebo nově rozvíjenými technologiemi je vlastnost, která je pro účely praxe přesně normována. Jedná se o technologickou vlastnost obrobků, která ve značné míře ovlivňuje životnost a spolehlivost součástí, energetické ztráty, odolnost proti opotřebení a ekonomiku strojů a zařízení.

V normě [6] je definována škála základních metrologických operací, sloužících ke stanovení požadované třídy kvality. Povrchy vytvořené nekonvenčními technologiemi mají odlišnou geometrickou charakteristiku. Zachování kompatibility se stávajícími normami a metrologií při obrábění AWJ se jako základní ukazatele kvality povrchu obrobků opracovaných touto technologií volí parametry R_a , R_z , R_q [18].

4.2 Charakteristika profilu vzorků řezaných AWJ

Tvar řezné plochy je patrný z obr. 3.2, mění se s hloubkou působení čela AWJ od povrchu obráběného vzorku a je zákonitě obrazem změn probíhajících v mechanismu dezintegrace. Vytvořená řezná plocha se dá dělit na horní část kvalitního hladkého řezu a od určité kritické hloubky na část deformovaného řezu. Nerovnosti v horní části řezu jsou jimi kvalifikovány jako mikroskopické a tvoří je hlavně nerovnosti řádu drsnosti. Nerovnosti na spodní části řezu jsou makroskopické s výskytem tzv. rýhování, drážkování povrchu a nerovností řádu vlnitosti [18].

5 Metody pro měření struktury povrchu

Na počátku 20. století, kdy byly vyvinuty první přístroje pro měření topografie povrchu, byl učiněn velký pokrok v metodách a zařízeních pro měření. Výrazným pokrokem bylo uplatnění digitálních metod v 60-tých letech, které umožňovali hodnocení povrchu metodou 3D. Metody a přístroje pro měření topografie povrchu, které poměrně vyčerpávajícím způsobem uvádí literatura [5], lze zjednodušeně rozdělit na tři základní skupiny:

- mechanické metody,
- optické metody,
- jiné metody.

5.1 Mechanické metody

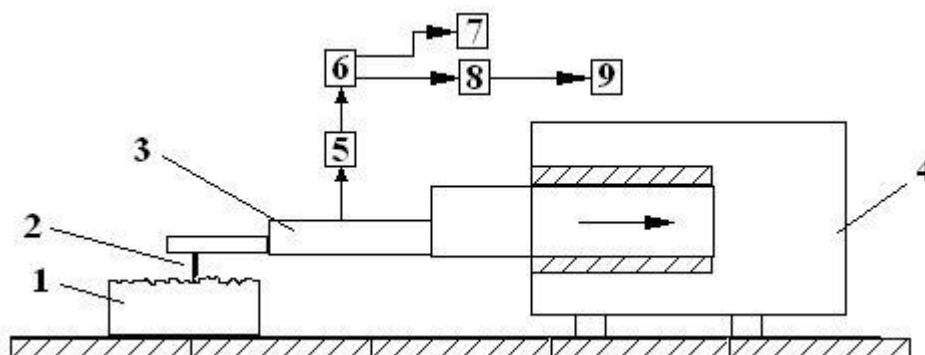
Mechanické (dotykové) metody jsou nejrozšířenějšími metodami, zejména ve strojírenské praxi. Jejich výhodou je přímé měření, schopnost zobrazit měřený geometrický profil, použití pro všechny typy povrchů, naměřené hodnoty lze použít jako vztažné a srovnávací hodnoty pro jiné metody měření. Nicméně v důsledku tlaku na hrot snímače dochází k elastické a plastické deformaci v povrchové vrstvě. Dochází k tomu, že hrot snímače poškodí měřený povrch, což je nevhodné pro hodnocení povrchu a výsledek měření. V tabulce 5.1 jsou uvedeny výhody a nevýhody mechanických metod.

Tabulka 5.1- Výhody a nevýhody mechanických metod

Výhody	Nevýhody
Měření parametrů topografie povrchu je přímé.	Destrukce povrchu u měkkých materiálů.
Lze použít pro kalibraci výsledků z nepřímých metod.	Relativně malý pohyb hrotu po měřeném povrchu.
Velký rozsah rozlišení ve směru kolmém na plochu.	Neumožňuje kontinuální kontrolu a řízení kvality povrchu.
Vysoká rozlišovací schopnost.	Měření nemůže být dálkové.

5.1.1 Kontaktní profilometr HOMMEL TESTER T8000

Princip měření pomocí tohoto přístroje (obr. 5.1) je založen na kontaktu hrotu a měřeného povrchu materiálu. Hrot je připevněn na rameno, které se vysouvá a zasouvá do samotného přístroje a přes jemný mechanismus získává údaje z povrchu materiálu. Naměřená data se přenášejí do počítače a vyhodnocují.



Obrázek 5.1 - Schéma kontaktního profilometru [43]

1 - měřená součást, 2 - měřící hrot, 3 - snímací hlavice,
4 - posunový mechanismus, 5 - zesilovač, 6 - filtr, 7 - registrační
jednotka, 8 - jednotka zpracovávající měřicí signál,
9 - zobrazovací jednotka

5.2 Optické metody

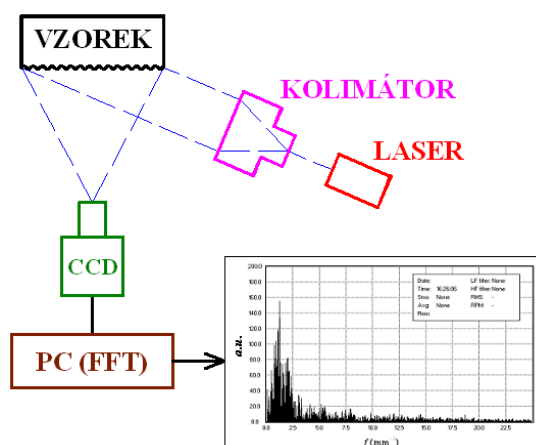
Jedná se o bezdotykové měření, čímž je vyloučeno poškození měřeného povrchu. Výhody a nevýhody této metody jsou uvedeny v tab. 5.2.

Tabulka 5.2 - Výhody a nevýhody optických metod

Výhody	Nevýhody
Schopnost kontinuální kontroly a řízení kvality povrchu.	Měření parametrů topografie je nepřímé.
Opakovatelnost měření.	Složitější interpretace výsledků.
Bezkontaktnost a nedestruktivnost.	Ztížená korelovatelnost na normované parametry.
Možnost měření z větší vzdálenosti.	
Okamžité výsledky.	

5.2.1 Stínová metoda

Princip této metody je na obr. 5.2. Povrch vzorku je osvětlen laserem pod úhlem 15° , paprsek laseru prochází kolimátorem, který jej usměrňuje tak, aby osvětlil celou plochu měřeného vzorku. Tímto osvětlením vzniká distribuce světla a stínů. Tato distribuce světla a stínu je snímána CCD kamerou, která je napojena na PC s vyhodnocovacím programem signálu, který umožňuje provést rychlou Fourierovu transformaci (Fast Fourier Transform). Pomocí této transformace získáváme amplitudově-frekvenční spektrum [8].

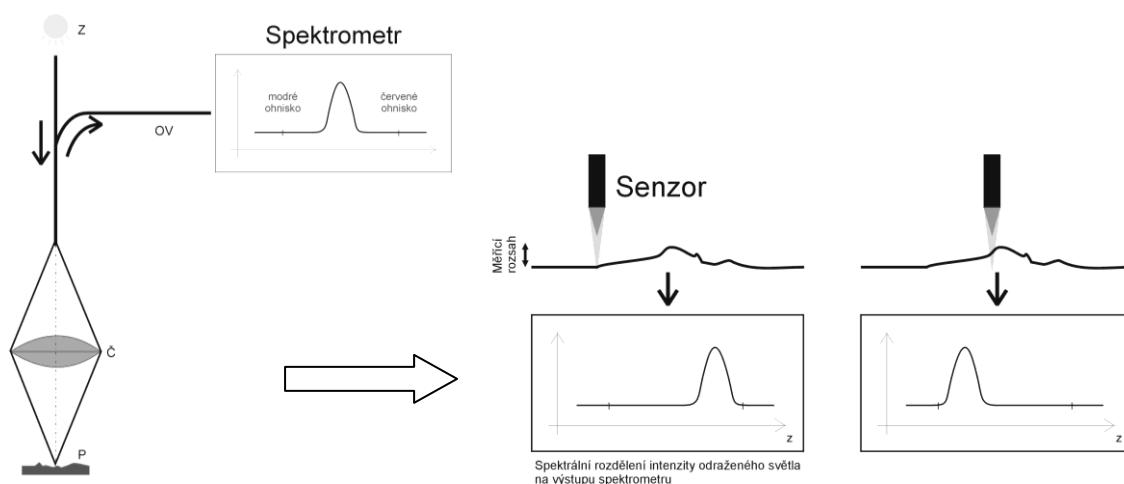


Obrázek 5.2 - Princip bezkontaktní optické stínové metody

5.2.2 Optický profilometr MicroProf FRT

Princip činnosti optického profilometru MicroProf FRT je na obr. 5.3. Bílé světlo ze zdroje Z je optickým vláknem OV přivedeno ke spojné čočce Č, která v důsledku své chromatické aberace fokusuje jednotlivé monochromatické složky bílého světla do různé výšky nad vztažnou rovinou. Po dopadu na studovaný povrch vzorku je fokusované světlo optimálně odraženo zpět do zmíněné čočky a optickým vláknem přivedeno do miniaturního spektrometru. Hodnota vlnové délky maxima intenzity světla vystupujícího ze spektrometru je pomocí kalibrační tabulky převedena na hodnotu vzdálenosti mezi senzorem a povrchem vzorku (obr. 5.3). V této vzdálenosti jsou zahrnuty nejen výškové nerovnosti povrchu, ale i tzv. pracovní

vzdálenost senzoru od vztažné roviny. Pracovní vzdálenost je rovna 5 mm, tj. měření je vždy nekontaktní a nedestruktivní [28].



Obrázek 5.3 - Princip činnosti optického profilometru MicroProf FRT

5.3 Jiné metody

Dále existuje celá řada jiných metod, které pracují na odlišném principu než mechanickém nebo optickém. Mezi nejznámější metody patří:

5.3.1 RTG metoda

Využívá atomárních vlastností materiálu povrchu po jejich iniciaci X-paprsky, jejichž vlnová délka je přibližně stejná jako vzdálenost atomu v krystalické mřížce.

5.3.2 SEM (scanning electron microscopes)

Je založena na analýze proudu elektronů odražených povrchem a kalibraci na parametry topografie povrchu (elektrony jsou urychlovány vysokonapěťovým elektrostatickým polem mezi dvěma nebo třemi magnetickými čočkami).

5.3.3 MFM (magnetic force microscopes)

Umožňuje na základě zmagnetování studovaného vzorku snímat jeho magnetické projevy a jejich analýzou, kalibrací a korelací určit funkční vztahy popisující topografie povrchu.

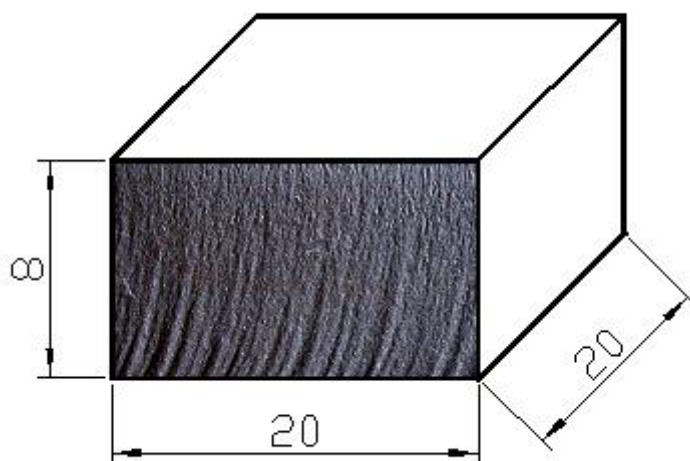
6 Experimentální část

Tato kapitola se věnuje celkové přípravě vzorků od úvodního nastavení experimentu přes provedení ověřovacích měření dostatečného souboru na vzorcích z odlišných materiálů pomocí různých metod hodnocení topografie povrchu, následné analýze dat, matematicko-statistickému zpracování hodnot za účelem odvození způsobu predikce optimální posuvné rychlosti pro různé materiály z hlediska jakosti povrchu, po verifikaci odvozeného predikčního vztahu.

6.1 Příprava vzorků

Pro experimentální část bylo k dispozici 30 vzorků (viz obr. 6.1) vytvořených hydroabrazivním dělením s rozměrem 8 x 20 x 20 mm. Vzorky byly nařezány z různých kovových materiálů (ČSN 11 375, 13 116, ČSN 17 251, ČSN 411 503, ČSN 422 712, AlCu, AlMg, Dural, Mosaz, Zinek). Při dělení uvedených kovových materiálů vodním abrazivním paprskem byly použity tři druhy abraziva (Austenitický granát, granát Barton, Olivín). Veškeré vstupní referenční technologické parametry, které byly voleny při opracování těchto 30-ti zkušebních vzorků, jsou uvedeny v tab. 6.1. Pro získání dostatečného množství analytických informací z vytvořených vzorků bylo použito několik metod pro měření struktury povrchu a to pomocí stínové metody, kontaktního profilometru HOMMEL TESTER T8000 a optického profilometru MicroProf FRT.

Pro stanovení výškových a podélných fluktuací naměřených signálů intenzity odraženého světla podle distribuce nerovností povrchu byla v první etapě hodnocení použita stínová metoda. Tato analýza byla provedena na kovových materiálech ČSN 11 375, 13 116, ČSN 17 251, ČSN 411 503, ČSN 422 712, AlCu, AlMg, Dural, Mosaz, Zinek. Měření bylo realizováno na výšce vzorků 8 mm ve 22-ti konvenčně stanovených úrovních s krokem 0,348 mm a na 4 stranách opracovaných různými posuvnými rychlostmi řezné hlavy (200, 150, 100 a 50 mm·min⁻¹), a to v 6 různých frekvenčních pásmech (viz obr. 6.2). Pro měkké slitiny hliníku byly použity vyšší posuvové rychlosti (400, 300, 200 a 100 mm·min⁻¹), aby byly více patrnější odlišnosti povrchu ve formě rýhování, které zanechává nekonvenční technologie AWJ.



Obrázek 6.1 - Schematické znázornění zkušební vzorku

Pro další analýzy byly využity kontaktní profilometr HOMEL TESTER T8000 a optický profilometr MicroProf FRT. Bližší popis metodiky získávání dat z vyhotovených vzorků pomocí hydroabrazivního kapalinového paprsku bude uveden v následující podkapitole měření povrchu vzorků.

Zvolené hlavní technologické parametry pro opracování zkušebních vzorků jsou uvedeny v tab. 6.1 a představují základní technologický režim, který můžeme ve vztahu k různým změnám považovat za referenční.

Tabulka 6.1 - Nastavení vstupních technologických parametrů AWJ

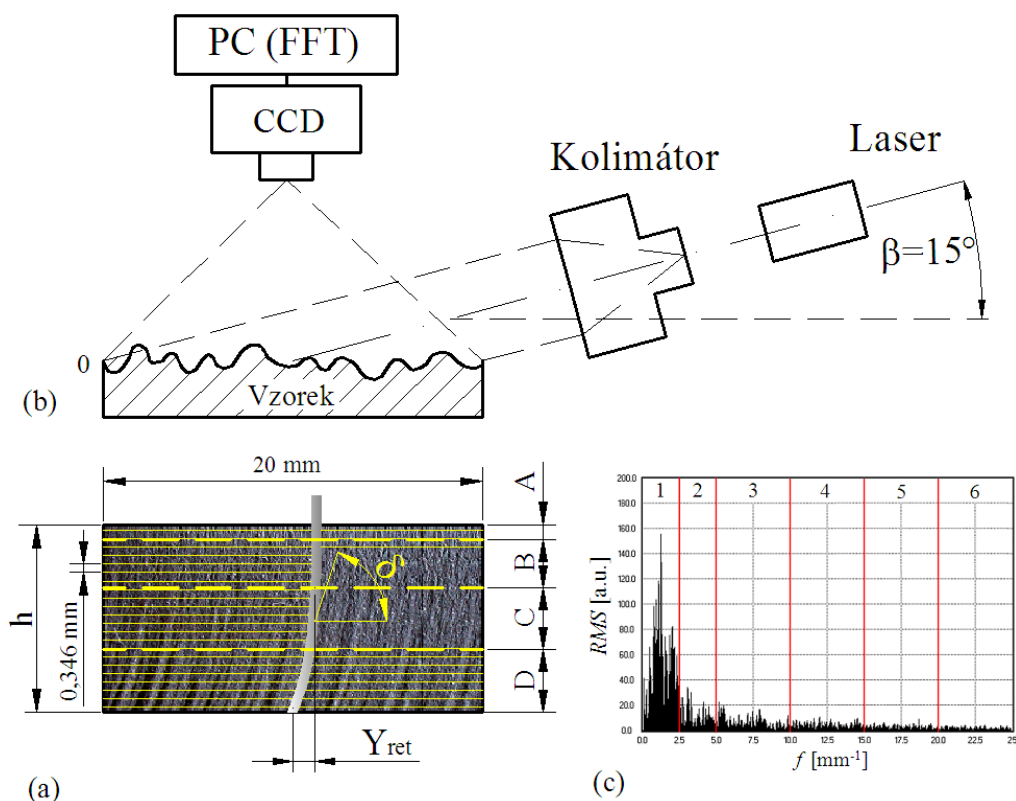
Konstantní faktory	Hodnoty	Konstantní faktory	Hodnoty
Tlak p [MPa]	300	Vzdálenost trysky od povrchu L [mm]	2
Průměr trysky d_o [mm]	0,25	Velikost abraziva [MESH]	80
Průměr usměrňovací trubice d_a [mm]	0,8	Proměnné faktory	Hodnoty
Délka usměrňovací trubice l_a [mm]	76	Posuvová rychlost v_p [mm·min ⁻¹]	50, 100, 150, 200, 300, 400
Hmotnostní průtok abraziva m_a [g·min ⁻¹]	250	Abrazivní materiál	Granát Barton
Tloušťka materiálu h [mm]	8	Řezná hlava	Flow Inc. Paser III.
Charakteristika zařízení PTV - 37- 60 Pump			
Multiplikátor	Dvojčinný	Tlak vody (max)	415 MPa
Elektrický příkon	37 kW	Průtok vody (max)	3,68 l·min ⁻¹

6.2 Měření povrchu vzorků

6.2.1 Měření vytvořených vzorků AWJ stínovou metodou

V kapitole 5 (metody pro měření struktury povrchů) je vysvětlen princip stínové metody na obr. 5.2. Podle uvedeného schématu na obr. 5.2 a 6.2 byla sestavena prototypová měřicí aparatura, která sloužila k proměření experimentálně vytvořených vzorků za vstupních referenčních technologických parametrů uvedených v tab. 6.1. Povrch vzorku byl osvětlen laserem procházejícím kolimátorem, který jej usměrnil tak, aby osvětlil celou plochu měřeného vzorku pod úhlem 15°. Na takto osvětleném topografickém povrchu vzniká distribuce světla a stínů, která je snímána CCD kamerou viz obr. 6.2 – (b). Tato kamera umožnila podstatné zrychlení prorastování celých ploch, a to při stejné plošné rozlišovací schopnosti 0,02 mm dosažené záznamem 1024 pixelů na celé délce vzorku. Distribuční změny intenzit byly detekovány CCD kamerou s 1090 x 1370 pixelů 2/3“ čipem. Byla volena adjustační vzdálenost čočky objektivu 1,4/50 mm okolo 200 mm od měřeného objektu při 0,33 x

zvětšené efektivní oblasti kamery CCD, která byla napojena na PC s vyhodnocovacím programem signálu, který umožňuje provést rychlou Fourierovu transformaci (Fast Fourier Transform). Pomocí této transformace získáváme amplitudově-frekvenční spektrum, viz obr. 6.2 – (c).

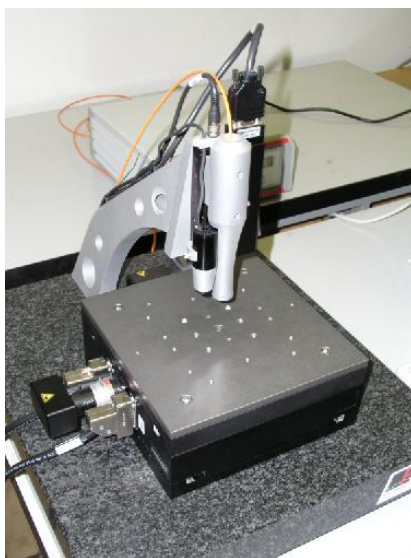


Obrázek 6.2 - (a) Fotografie povrchu dělicí řezné stěny (zvětšeno 12krát) a navržené hlavní parametry profilu povrchu podle tab. 10.1, kde Y_{ret} je zakřivení stopy AWJ, A je iniciační, B hladká zóna, C je přechodná zóna, D je zryhovaná zóna a δ je deviační úhel, (b) schéma stínové metody a (c) amplitudově-frekvenční spektrum studovaného povrchu (materiál: ocel ČSN 17 251, posuvná rychlost řezné hlavy 200 mm·min⁻¹) získané z jedné vodorovné měřické linie o délce 20 mm v hloubce 6 mm od povrchu.

Na základě měření topografie povrchu generovaného AWJ jsou získávány hodnoty RMS , které byly dále porovnány s daty získanými z optického profilometru MicroProf FRT i kontaktního profilometru HOMMEL TESTER T8000. Na základě této komparace byly určeny přepočtové konstanty mezi RMS a normovanými parametry, a to pro parametr Ra , Rq a Rz . Blíže se přepočtovým konstantám budu věnovat v pozdější části této kapitoly.

6.2.2 Měření vytvořených vzorků AWJ optickým profilometrem

Při zjišťování struktury povrchu optickým profilometrem MicroProf FRT byl vzorek umístěn na skenovacím stolku, jehož velmi rychlý a přesný pohyb v definovaných liniích pod nepohybujícím se senzorem umožnil získat údaje o topografii studovaného povrchu nejen podél zvolené linie, ale z celé plochy povrchu. Z blíže popsaného principu činnosti optického profilometru v kapitole 5 (obr. 5.3 a 6.3) je zřejmé, že senzor optického profilometru nesleduje svým pohybem profil povrchu, ale získává potřebná data nezávisle z každého měřicího bodu. Tato skutečnost vede k vysoké rychlosti měření.



Obrázek 6.3 - Optický profilometr MicroProf FRT

6.2.3 Měření vytvořených vzorků AWJ kontaktním profilometrem

Tato nejrozšířenější mechanická (dotyková) metoda byla blíže popsána v kapitole 5. Při analýze povrchové struktury dělicích stěn vytvořených hydroabrazivním kapalinovým paprskem byl využit kontaktní profilometr HOMMEL TESTER T8000. Schéma a popis měřicího přístroje je na obr. 5.1. Výhodou tohoto přístroje je, že měření parametrů topografie povrchu je přímé, což nám posloužilo pro kalibraci výsledků ze stínové metody. Obrovská nevýhoda této dotykové metody byla nerealizovatelnost měření v okrajových oblastech povrchu vzorku. Z 22-ti konvenčně stanovených linií nebylo možné pomocí kontaktního profilometru HOMMEL TESTER T8000 získat data z prvních a posledních 3 linií. Tudíž proměřené linie byly 4 až 19 (16 linií).

6.3 Analýza experimentálních dat ze stínové metody

Na povrchu nově vytvořených dělicích stěn můžeme pozorovat nerovnosti mikroskopické, které tvoří převážně nerovnosti řádu drsnosti a vyskytují se v horní části řezu. Dále zde pozorujeme nerovnosti makroskopické s výskytem tzv. rýhování, drážkování povrchu a nerovností řádu vlnitosti.

Jak vyplývá z mnohých experimentů, s rostoucí hloubkou h dělicího řezu nám průběžně klesá kinetická energie paprsku, což je hlavní příčinou růstu nerovnosti povrchu. Při tomto procesu dochází k tomu, že rostou jejich výškové amplitudy a současně se snižují jejich prostorové frekvence. Je to způsobeno změnou mechanismu úběru materiálu, kdy z převládajícího tahového a smykového napětí se stává tlakové napětí.

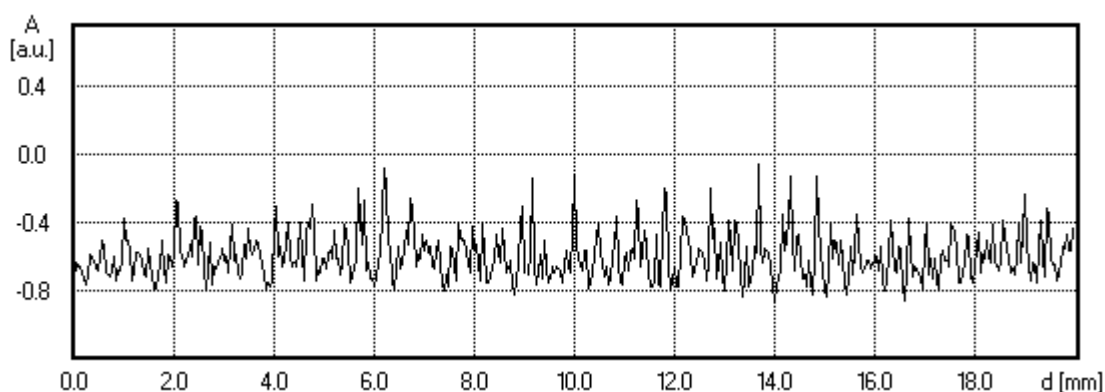
Z konvenčně stanovených 22-ti měřených linií bylo získáno 22 signálů z profilu zkoumaného vzorku. Ukázka získaných signálů ze 4 různých linií je na obr. 6.4, obr. 6.6, obr. 6.8 a obr. 6.10 pro materiál ČSN 17 251 nařezaný při posuvové rychlosti $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Ze všech signálů bylo dále pomocí FFT získáno 22 amplitudově-frekvenčních spekter. Pro již dříve zvolené 4 linie jsou na obr. 6.5, obr. 6.7, obr. 6.9 a obr. 6.11 ukázky amplitudově-frekvenčních spekter. Každé získané spektrum je reprezentováno parametrem RMS , což je výstupní signál, který

vyhodnocujeme pomocí stínové metody. Tento parametr je lineárně vázán k parametru Ra podle empiricky získaného vztahu

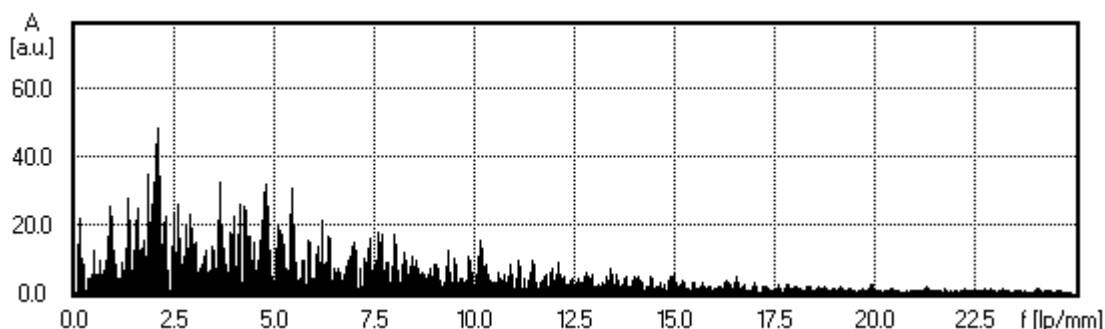
$$RMS = k_S Ra, \quad (4)$$

kde k_S je konstanta závislá na přístroji. Celková hodnota RMS reprezentuje jeden signál, který je zpracován FFT a je definován jedním bodem (pro $RMS = f(I_p)$) [28].

K analýze experimentálních dat získaných pomocí stínové metody, kdy dostáváme informace o profilu povrchu, použijeme v dalším kroku program Vibroanalyzér. Pomocí tohoto programu převádíme signál ze zkoumané linie vzorku na amplitudově-frekvenční spektrum, z kterého dále získáváme hodnoty RMS . Pro názorný příklad postupu zpracování byl vybrán materiál ČSN 17 251 vytvořený při posuvové řezné rychlosti $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Na obr. 6.4 vidíme profil povrchu zkoumaného vzorku, který pomocí FFT převedeme na amplitudově frekvenční spektrum, které je na obr. 6.5, kde jsou vidět velké amplitudy s malou frekvencí, což představuje velké nerovnosti jako je vlnitost a pak nízké amplitudy o vysokých frekvencích představující drsnost povrchu. Hranice mezi vlnitostí a drsností není jednoduché určit už jenom z důvodu, že vlnitost není přesně definována v normě.



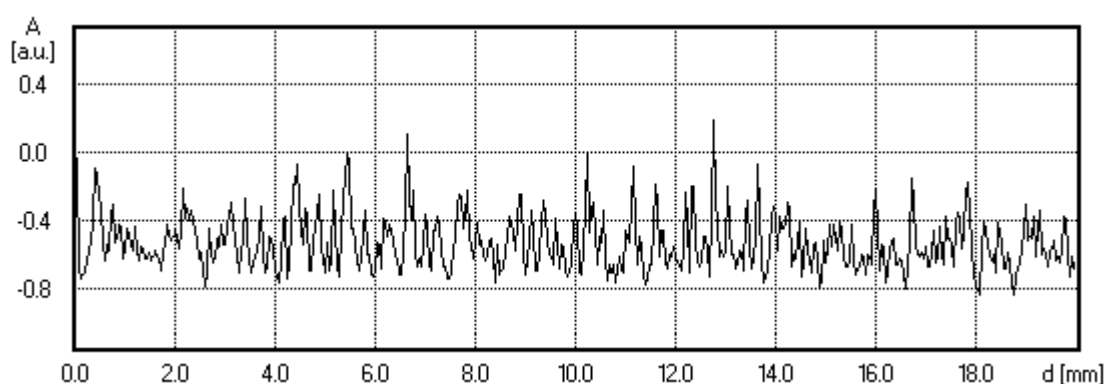
Obrázek 6.4 – Profil povrchu zkoumaného vzorku (materiál: ocel ČSN 17 251, posuvná rychlost řezné hlavy $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) naměřený ve 4. vodorovné měřické linii o délce 20 mm v hloubce 1,39 mm od povrchu



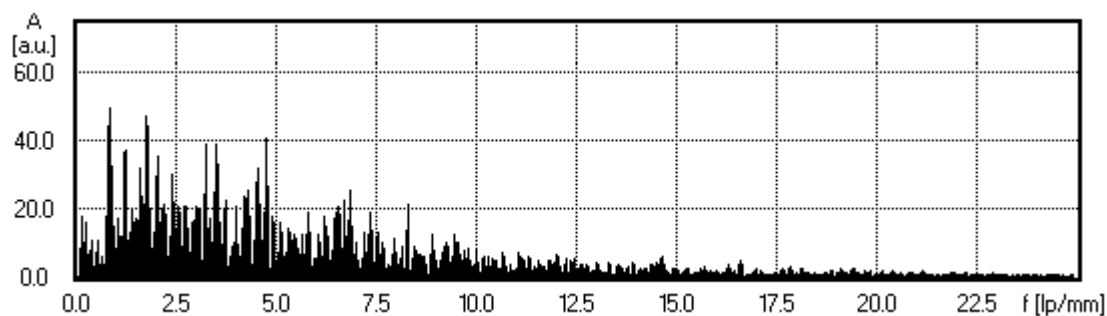
Obrázek 6.5 – Amplitudově-frekvenční spektrum studovaného povrchu (materiál: ocel ČSN 17 251, posuvná rychlost řezné hlavy $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) získané ze 4. linie o délce 20 mm v hloubce 1,39 mm od povrchu

V následujících grafech je vidět zvyšování amplitud (obr. 6.7, obr. 6.9 a obr. 6.11), což značí zvyšování drsnosti. Jak již bylo dříve uvedeno, drsnost povrchu dělicích stěn vytvořených technologií AWJ roste se zvyšující se hloubkou řezu.

Z amplitudově-frekvenčních hodnot se získalo celkové *RMS* povrchu z dané linie. Jelikož osa y nemá pevně stanovenou jednotku, bylo třeba provést kalibraci pomocí dat z kontaktního profilometru a optického profilometru.

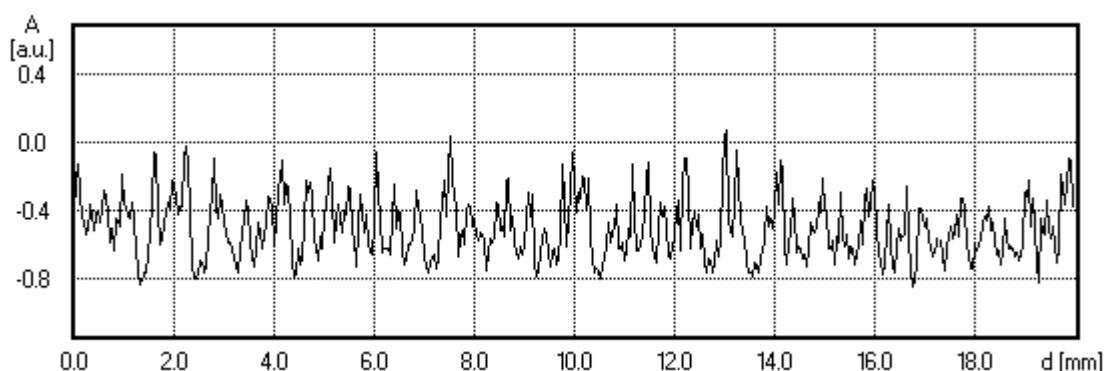


Obrázek 6.6 - Profil povrchu zkoumaného vzorku (materiál: ocel ČSN 17 251, posuvná rychlost řezné hlavy $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) naměřený v 9. vodorovné měřické linii o délce 20 mm v hloubce 3,13 mm od povrchu

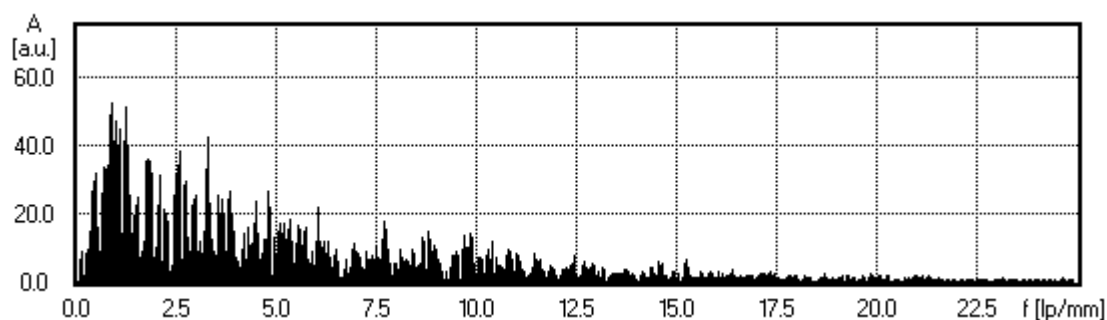


Obrázek 6.7 - Amplitudově-frekvenční spektrum studovaného povrchu (materiál: ocel ČSN 17 251, posuvná rychlost řezné hlavy $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) získané z 9. linie o délce 20 mm v hloubce 3,13 mm od povrchu

Signál ze 14. vodorovné měřické linie (obr. 6.8) dosahuje výrazně vyšších hodnot na ose y než je tomu u signálu ze 4. linie. Pomocí FFT dostáváme amplitudově-frekvenční spektrum (viz obr. 6.9) děleného povrchu v hloubce 4,87 mm, kde je již dobře pozorovatelné zvýšení amplitud v nízkých frekvencích, které představují povrch s větší drsností.

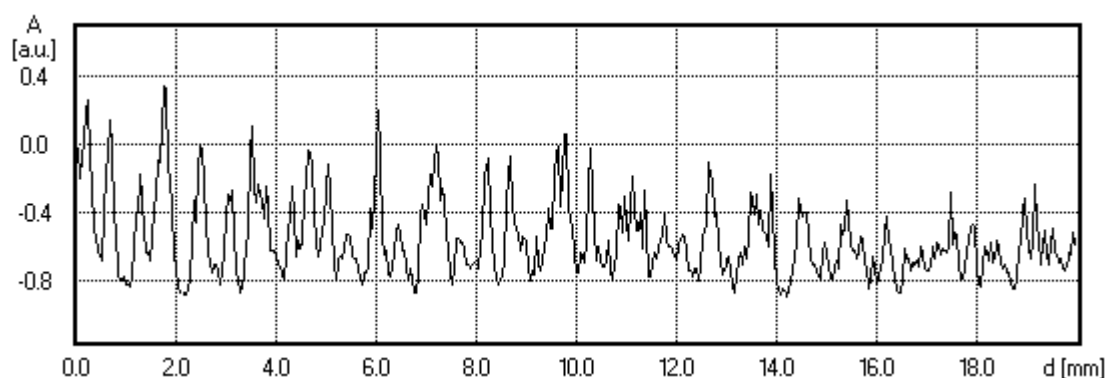


Obrázek 6.8 - Profil povrchu zkoumaného vzorku (materiál: ocel ČSN 17 251, posuvná rychlost řezné hlavy $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) naměřený ve 14. vodorovné měřické linii o délce 20 mm v hloubce 4,87 mm od povrchu



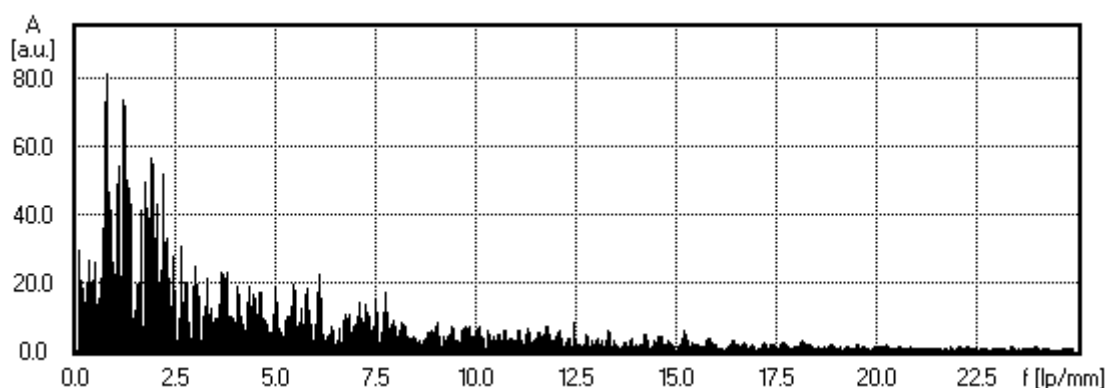
Obrázek 6.9 - Amplitudově-frekvenční spektrum studovaného povrchu (materiál: ocel ČSN 17 251, posuvná rychlost řezné hlavy $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) získané ze 14. linie o délce 20 mm v hloubce 4,87 mm od povrchu

Signál z 19. vodorovné měřické linie (obr. 6.10) dosahuje nejvyšších hodnot na ose y při porovnání dat ze signálů ze 4., 9. a 14. linie. Program Vibroanalyzér pomocí FFT vyhodnotí amplitudově-frekvenční spektrum (viz obr. 6.11) děleného povrchu v hloubce 6,61 mm, kde skutečná drsnost dosahuje hodnot 7 až $9 \mu\text{m}$.



Obrázek 6.10 - Profil povrchu zkoumaného vzorku (materiál: ocel ČSN 17 251, posuvná rychlost řezné hlavy $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) naměřený v 19. vodorovné měřické linii o délce 20 mm v hloubce 6,61 mm od povrchu

V 19. měřené linii lze tedy již zřetelně pozorovat zvýšení amplitud v nízkých frekvencích, které představují povrch s velkou drsností, s výskytem tzv. rýhování či drážkování vytvořeného povrchu.



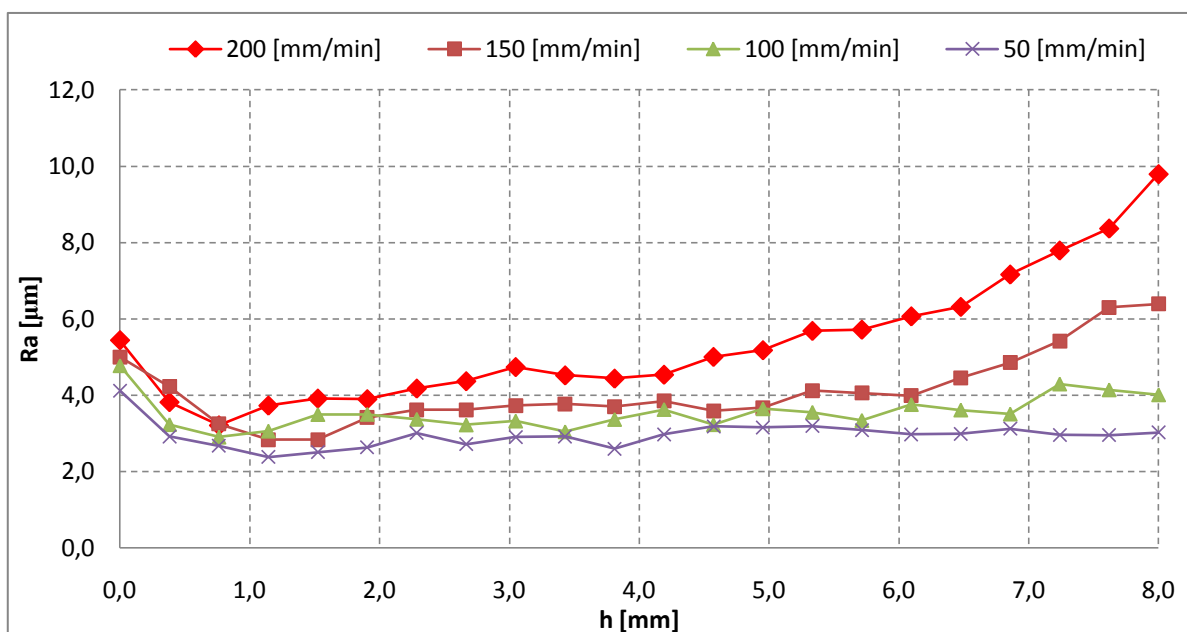
Obrázek 6.11 - Amplitudově-frekvenční spektrum studovaného povrchu (materiál: ocel ČSN 17 251, posuvná rychlost řezné hlavy $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) získané z 19. linie o délce 20 mm v hloubce 6,61 mm od povrchu

6.4 Vytvoření převodních koeficientů a komparace použitých metod

Získané hodnoty *RMS* pomocí stínové metody (obr. 6.2), umožňují sledovat vztahy k jiným geometrickým a optickým charakteristikám povrchové vrstvy, korelační vztahy popisující mechanismus dezintegračního procesu i okamžitý napětově-deformační stav řezu a obráběného materiálu. Parametr *RMS* je lineárně vázán ke geometrickému parametru *Ra*, *Rq* a *Rz* podle empiricky získaného vztahu (4), který je uveden v dřívější podkapitole.

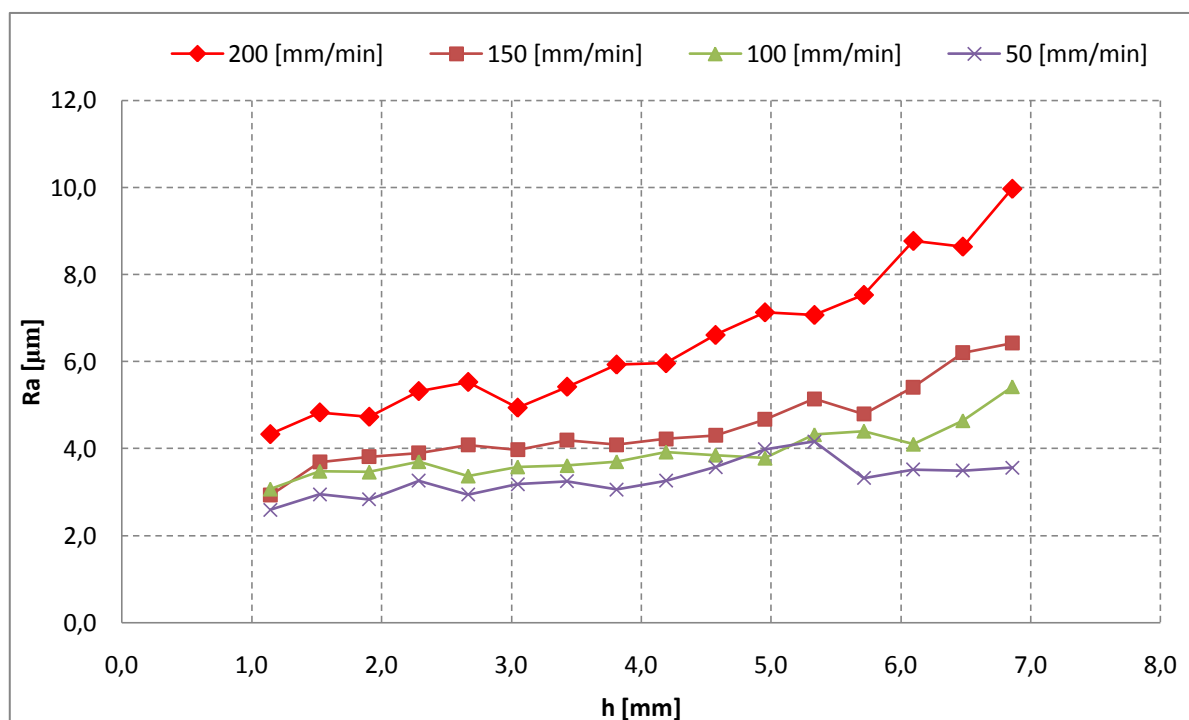
Pro stanovení převodních koeficientů byla provedena matematicko-statistická analýza naměřených dat získaných ze stínové metody, kde byla využita CCD kamera, dále pak z optické metody s využitím optického profilometru MicroProf FRT a mechanické metody s pomocí kontaktního profilometru HOMEL TESTER T8000. Takto naměřené hodnoty *RMS* ze stínové metody byly porovnány s hodnotami *Ra* z optické metody a mechanické metody a byly stanoveny převodní koeficienty pro jednotlivé materiály a řezné rychlosti, kterými byly vzorky vytvořeny. Převodní koeficienty byly vytvořeny podle empiricky získaného vztahu (4).

Grafické znázornění naměřených hodnot drsnosti R_a povrchu dělicích stěn vytvořených technologií AWJ posuvovými rychlostmi 200, 150, 100 a 50 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ pro materiál ČSN 17 251 s využitím optické metody pomocí optického profilometru MicroProf FRT je na obr. 6.12.



Obrázek 6.12 - Závislost skutečně naměřené hodnoty drsnosti R_a pomocí optického profilometru MikroProf FRT na hloubce h a rychlosti posuvu v_p pro ocel ČSN 17 251

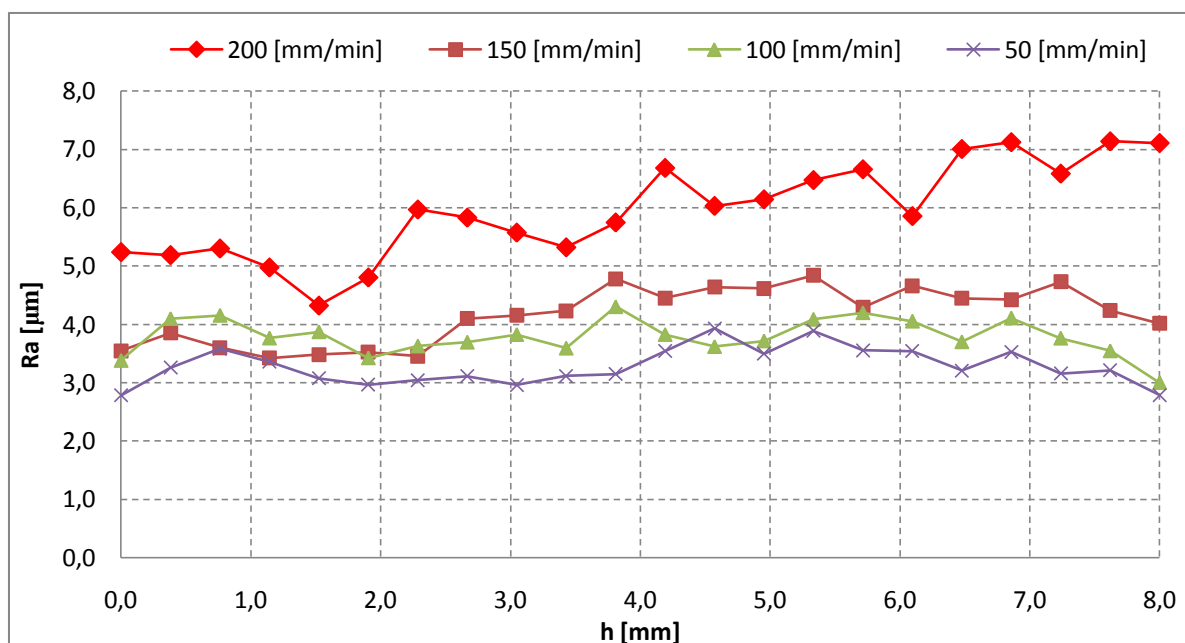
Skutečně naměřené hodnoty drsnosti R_a proměřené pro 16 linií pomocí kontaktního profilometru HOMMEL TESTER T8000 při rychlosti posuvu 200, 150, 100 a 50 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ pro materiál ČSN 17 251 jsou na obr. 6.13. Při analýze povrchové struktury dělicích stěn vytvořených hydroabrazivním kapalinovým paprskem s využitím kontaktního profilometru HOMMEL TESTER T8000 nebyly proměřeny 3 horní a dolní okrajové linie. U mechanické metody nelze realizovat měření v okrajových oblastech povrchu vzorku. Je to nevýhoda této dotykové metody, kdy snímač, který má tvar hrotu nesmí najíždět na okrajové části, aby nedošlo ke kolizi a následnému poškození zařízení a hodnoceného vzorku.



Obrázek 6.13 - Závislost skutečně naměřené hodnoty drsnosti R_a pomocí kontaktního profilometru HOMMEL TESTER T8000 na hloubce h a rychlosti posuvu v_p pro ocel ČSN 17 251

Jak již bylo dříve zmíněno, data získaná ze stínové metody, kdy se signálu povrchu vzorku pomocí FFT dostáváme amplitudově-frekvenční spektrum, nemají pevně stanovenou jednotku na ose y. Měření parametrů topografie povrchu pomocí kontaktního profilometru je přímé, což nám posloužilo pro kalibraci hodnot ze stínové metody. Jelikož kontaktní profilometr HOMMEL TESTER T8000 nemohl proměřit všech 22 konvenčně stanovených linií, bylo zapotřebí použít další metody pro získání dat ze všech 22-ti linií. Z tohoto důvodu jsme využili data z optické metody, pomocí kterých jsme provedli kalibraci a získali tak převodní koeficienty, které jsme dosadili do vzorce (4) a získali tak $R_a=f(RMS)$. Na obr. 6.14 je grafické znázornění vypočtených drsností $R_a=f(RMS)$ pro materiál ČSN 17 251 nařezaný podle vstupního referenčního nastavení technologie AWJ v tab. 6.1 při rychlosti posuvu 200, 150, 100 a 50 mm·min⁻¹.

Hodnoty, které byly využity pro výpočet převodních koeficientů, byly získány v rámci projektů IGS516/6 a IGS2103/516.



Obrázek 6.14 - Závislost drsnosti $Ra=f(RMS)$ na hloubce h a rychlosti posuvu v_p měřená stínovou metodou pro ocel ČSN 17 215

Drsnost povrchu roste vždy tam, kde klesá deformační napětí a deformační síla, tedy pracovní schopnost nástroje [28]. Při zvyšující se posuvové rychlosti a s rostoucí hloubkou h dělicího řezu se nám zhoršuje jakost obrobené plochy a roste drsnost povrchu.

Střední aritmetická úchylka profilu Ra [μm] je ve strojírenské praxi dosud nejčastěji používaný normovaný parametr, který popisuje geometrii povrchu vytvořeného obráběním. Experimentální analýza dat je v této práci matematicky a graficky předvedena na vzorku z materiálu ČSN 17 251. V tab. 6.2 je pro tento materiál prezentován přepočtový koeficient z naměřené hodnoty RMS na $Ra=f(RMS)$, na vzorku, jehož 4 strany byly opracované různými posuvovými rychlostmi (200, 150, 100 a 50 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$).

Srovnání matematicko-statisticky vypočítané hodnoty $Ra=f(RMS)$ se skutečně naměřenou drsností Ra z optického profilometru MikroProf FRT a kontaktního profilometru HOMMEL TESTER T8000 je uvedeno v tab. 6.2. Zde je také uvedena pro porovnání získaná hodnota RMS z amplitudově-frekvenčního spektra, které nám vyhodnotil program Vibroanalyzér ze stínové metody.

Tabulka 6.2 – Komparace vypočtené drsnosti $Ra=f(RMS)$ s naměřenou drsností Ra pomocí optického profilometru MicroProf FRT a kontaktního profilometru HOMMEL TESTER T8000 pro materiál ČSN 17 251 opracovaný posuvovou rychlostí $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

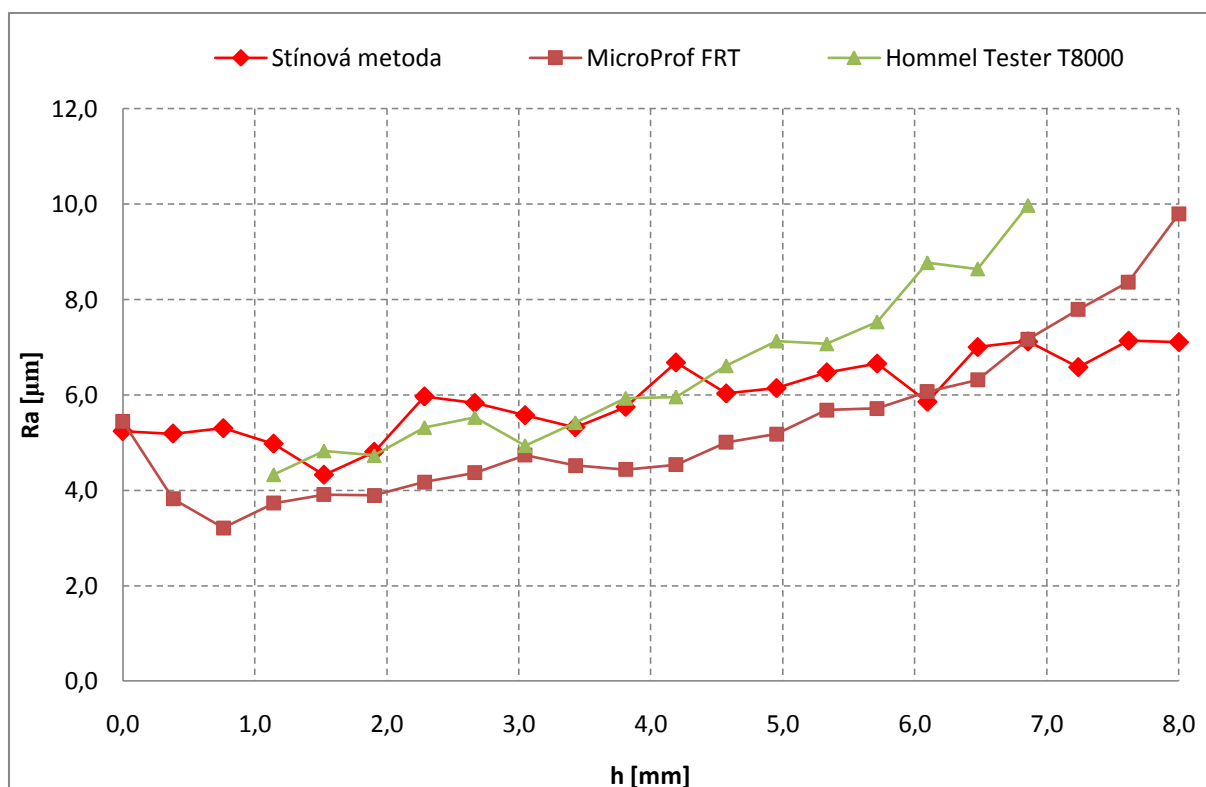
Řez číslo	h [mm]	RMS	Ra [μm]		
			RMS/30	MicroProf FRT	HOMMEL TESTER T8000
1	0,35	157,17	5,24	5,44	-
2	0,70	155,64	5,19	3,82	-
3	1,04	159,03	5,30	3,21	-
4	1,39	149,27	4,98	3,73	4,33
5	1,74	129,67	4,32	3,91	4,83
6	2,09	144,14	4,80	3,90	4,73
7	2,43	179,07	5,97	4,18	5,32
8	2,78	174,91	5,83	4,37	5,53
9	3,13	167,21	5,57	4,74	4,94
10	3,48	159,63	5,32	4,52	5,42
11	3,83	172,42	5,75	4,44	5,93
12	4,17	200,45	6,68	4,54	5,96
13	4,52	180,93	6,03	5,00	6,61
14	4,87	184,32	6,14	5,18	7,13
15	5,22	194,21	6,47	5,69	7,07
16	5,57	199,75	6,66	5,72	7,53
17	5,91	175,70	5,86	6,07	8,77
18	6,26	210,16	7,01	6,31	8,64
19	6,61	213,70	7,12	7,16	9,97
20	6,96	197,52	6,58	7,79	-
21	7,30	214,14	7,14	8,37	-
22	7,65	213,28	7,11	9,79	-

Při porovnání naměřených hodnot (viz tab. 6.2) ze stínové metody, optického profilometru MicroProf FRT a kontaktního profilometru HOMMEL TESTER T8000 můžeme sledovat velmi podobné hodnoty v prostření části grafu na obr. 6.15 (v oblasti 4 až 19 vodorovné měřické linie). Rozdíl je však na začátku a na konci

grafu. To je v první řadě způsobeno chybějícími hodnotami z kontaktního profilometru HOMMEL TESTER T8000 z důvodu nemožnosti proměření okrajových částí vzorků, což bylo již dříve podrobněji popsáno. V druhé řadě to je odchylka hodnot ze stínové metody od hodnot z optického profilometru. Tato odchylka je způsobena nedokonalostí stínové metody.

Na počátku dělicího řezu dochází k namáhání materiálu na interaktivní ploše řezné fronty, kde mechanismus úběru tvoří částice, které rotují zpětně proti směru posuvové rychlosti, čímž dochází k přímému odhození fragmentu, který není zpevňován a deponován na konci vrypu. Brázda po něm zůstává čistá až opticky vybroušená, což z pohledu optiky vyvolává opačný efekt. Takto vytvořený povrch dělicí stěny je lesklý a při měření stínovou metodou dochází ke zkreslení skutečné drsnosti R_a povrchu dělicí stěny. Odražené světlo ze stínové metody je tak silnější a indikuje hladký povrch. Pokud v nárazu převládá plastická složka, může dojít k zarytí a zakotvení abrazivního zrna do materiálu jak v rovině řezné fronty, tak i v rovině řezných stěn. Jde o mechanismus úběru, kdy abrazivní částice tlačí fragment materiálu, který je plasticky přetvořen, na konec vrypu a na konci vrypu (koryta) tento fragment deponuje. Odejmutý a zpevněný odštěpek musí být pak odstraněn následně dopadající částicí. Takto vytvořený povrch dělicí stěny materiálu je matný, což z pohledu optiky také vyvolává opačný efekt. Ve větších hloubkách řezu působí jiný problém, a to příliš velká nerovnost povrchu. Důvodem odlišně naměřených hodnot stínovou metodou je úhel 15° , pod kterým je optickou soustavou promítán světelný svazek, který po odrazu od měřeného povrchu prochází opět zobrazovací soustavou a dopadá na detektor, CCD kameru. Při osvětlení vzorku pod úhlem 15° dochází k neosvětlení nejhlubších míst povrchu. Děje se tak z důvodu blokování cesty paprsku vrcholky nerovností povrchu. To má za následek, že měřené místo je zastíněno ve větší ploše, čímž se snižuje rozlišovací schopnost přístroje.

Z výše popsaných důvodů budou tři první a tři poslední měřené linie vypuštěny z následujícího vyhodnocování naměřených dat.



Obrázek 6.15 – Komparace výsledků použitých metod pro materiál ČSN 17 251 vytvořený technologií AWJ při posuvové rychlosti řezné hlavy $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

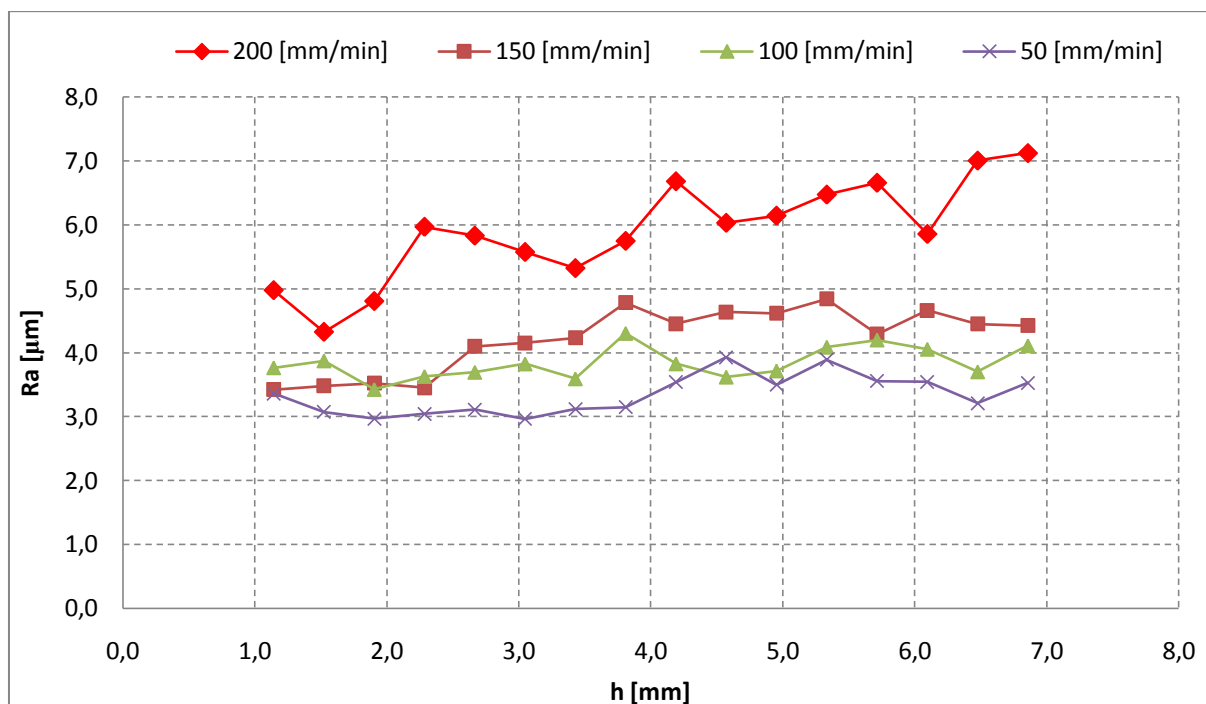
6.5 Komparace drsnosti povrchu vytvořeného technologií AWJ z hlediska posuvové rychlosti

Rychlost posuvu řezné hlavy je jedním z nejdůležitějších a technologicky nejsnadněji regulovatelným technologickým parametrem ve vztahu k drsnosti Ra . Na obrázcích 6.16, 6.17 a 6.18 je uvedena závislost drsnosti povrchu Ra na hloubce při různých rychlostech posuvu řezné hlavy při dělení kovových materiálů ČSN 17 251, ČSN 422 712 a AlMg. Grafy dokumentují, že s klesající rychlostí klesá dle teoretických předpokladů i naměřená drsnost povrchu. Měření bylo provedeno pomocí stínové metody. K následující analýze experimentálních dat získaných pomocí této metody byl použit v dalším kroku program Vibroanalyzátor. Pomocí tohoto programu jsme převedli signál ze zkoumané linie vzorku s využitím FFT na amplitudově-frekvenční spektrum, z kterého jsme dále získali hodnoty RMS . S využitím matematického vztahu (4), kdy byly dosazeny získané hodnoty RMS a

stanovené přepočtové koeficienty k_s pro jednotlivé materiály, jak je blíže popsáno v předcházející podkapitole vytvoření převodních koeficientů a komparace použitých metod, dostali jsme vypočítanou drsnost $Ra=f(RMS)$.

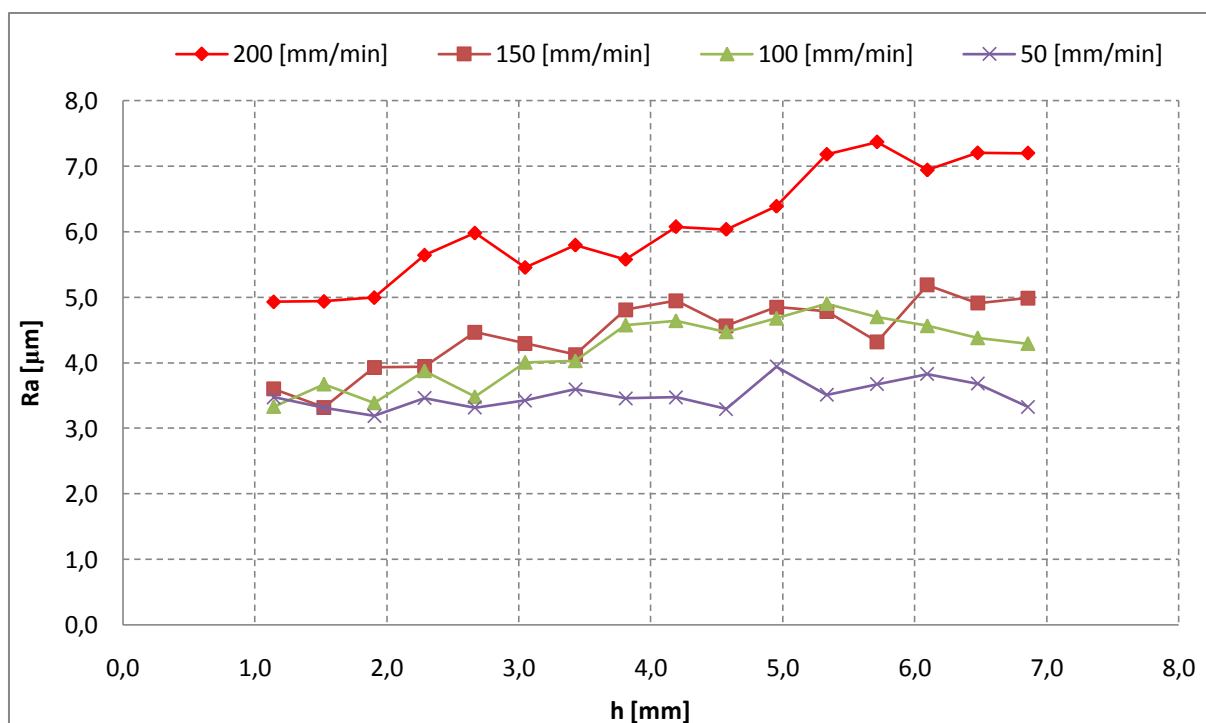
Znalost vlivu změny posuvové rychlosti a dalších jmenovaných technologických parametrů na finální stav povrchu a celkového řezu dělené plochy je velmi významná pro určení optimálního složení technologických parametrů, tedy pro optimalizaci technologického režimu z hlediska jakosti a celkového výkonu.

Vliv rychlosti posuvu v závislosti na drsnosti a hloubce pro ocel vidíme na obr. 6.16. Vzorky nařezané při posuvové rychlosti 50, 100 a 150 mm·min⁻¹ dosahují drsnosti dělené plochy povrchu v rozmezí 3 až 5 μm. Při těchto prvních třech rychlostech posuvu řezné hlavy při obrábění technologií AWJ je vzrůstající trend drsnosti podobný a nijak výrazně se neliší. Na obr. 6.16 lze jasně pozorovat větší odskok hodnot drsnosti povrchu získaných ze stínové metody teprve pro rychlost posuvu řezné hlavy 200 mm·min⁻¹.



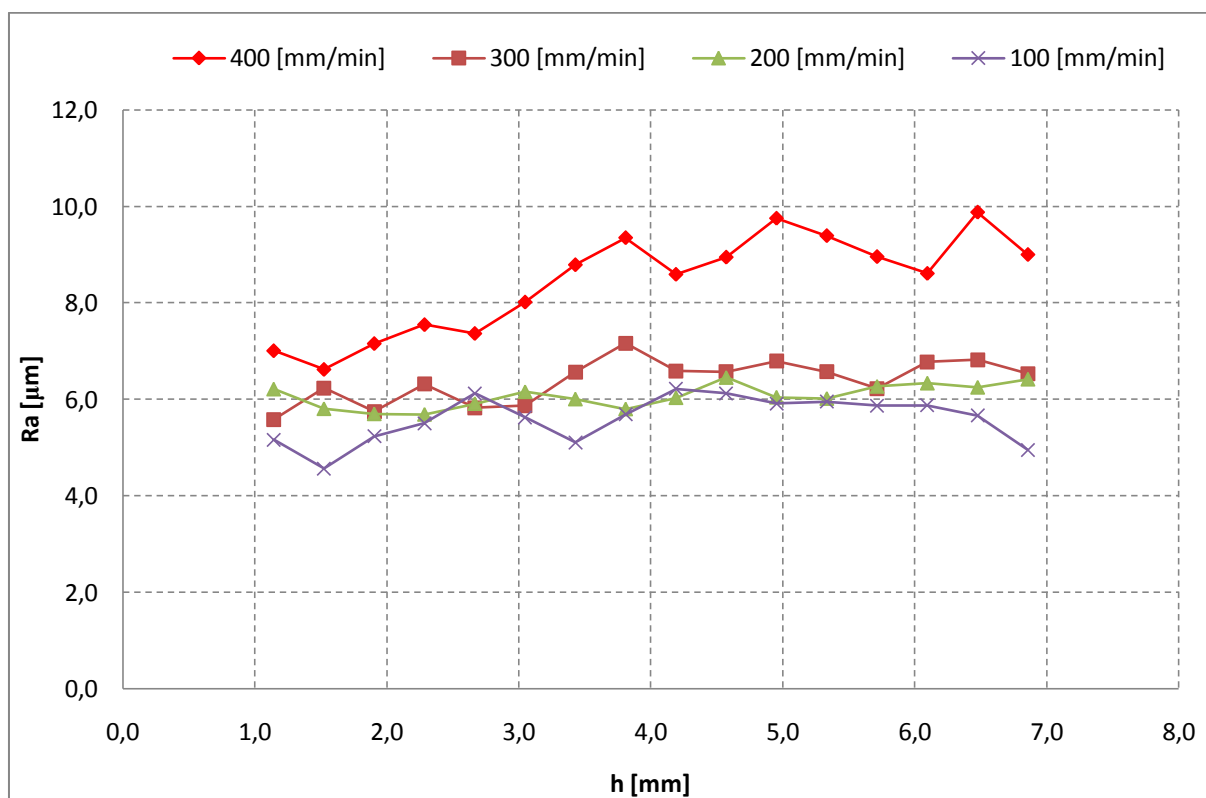
Obrázek 6.16 - Závislost drsnosti Ra na hloubce h a rychlosti posuvu v_p měřená stínovou metodou pro ocel ČSN 17 251

Na obr. 6.17 je grafické znázornění vlivu rychlosti posuvu v závislosti na drsnosti a hloubce pro litinu. Vzorky nařezané při posuvových rychlostech 50, 100 a 150 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ dosahují lehce vyšší drsnosti dělené plochy povrchu v porovnání s materiálem oceli (obr. 6.16), a to v rozmezí od 3,3 do 5,2 μm . Při těchto rychlostech posuvu řezné hlavy u litiny, stejně jako u oceli, při obrábění technologií AWJ pozorujeme podobný vzrůstající trend drsnosti, který se nijak výrazně od sebe neliší. Na obr. 6.17 vidíme teprve větší odskok hodnot drsnosti povrchu získaných ze stínové metody pro rychlost posuvu řezné hlavy 200 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Naměřené hodnoty drsnosti povrchu dělicí stěny jsou vyšší pro litinu nežli pro ocel. To je způsobeno tím, že modul pružnosti pro ocel (materiál ČSN 17 251) je 200 GPa a pro litinu (materiál ČSN 422 712) 211,7 GPa. Při stejném nastavení vstupních technologických parametrů AWJ pro materiály s různým modulem pružnosti tak dosahujeme vyšších hodnot drsnosti povrchu dělicích stěn u materiálu s větším modulem pružnosti.



Obrázek 6.17 - Závislost drsnosti R_a na hloubce h a rychlosti posuvu v_p měřená stínovou metodou pro litinu ČSN 422 712

Pro obráběný materiál AlMg (viz obr. 6.18) byly stanoveny vyšší posuvové rychlosti řezné hlavy a to 100, 200, 300 a 400 mm·min⁻¹, jelikož se jedná o měkký kov s nízkým modulem pružnosti, kde by u posuvových rychlostí 50, 100, 150 a 200 mm·min⁻¹, které jsou použity u materiálů ČSN 17 251 a ČSN 422 712, nebyla dostatečně patrná řezná stopa a dosahovaná drsnost obrobeného povrchu by byla zbytečně nízká. Při prvních třech posuvových rychlostí je odstup stejný a neliší se výrazně. Nejnižší rychlost má nejlepší kvalitu po celé hloubce řezu skoro stejnou. Jako optimální rychlost se z grafu jeví rychlost mezi 200 a 300 mm·min⁻¹. U měkkých materiálů jako je hliník, použití nejnižších rychlostí je zbytečné. Prudké zhoršení kvality topografie povrchu nastává až při rychlostech kolem 400 mm·min⁻¹.



Obrázek 6.18 - Závislost drsnosti R_a na hloubce h a rychlosti posuvu v_p měřená stínovou metodou pro AlMg

6.6 Návrh technologicky optimální posuvové rychlosti

Jedním z nejdůležitějších a technologicky nejsnadněji regulovatelných parametrů je rychlost posuvu řezné hlavy. Znalost vlivu změny rychlosti a ostatních technologických parametrů na stav finálního povrchu a celého dělicího řezu je velmi důležitá pro určení optimální skladby technologických parametrů, tedy pro optimalizaci technologického režimu z hlediska jakosti a celkového výkonu. V této části bude popsána současná predikce posuvné rychlosti a nový způsob stanovení technologicky optimální rychlosti řezné hlavy.

6.6.1 Kvantitativní stanovení technologicky optimální rychlosti řezné hlavy

Stanovení technologicky optimální posuvové rychlosti řezné hlavy pomocí rovnice pro výpočet optimálních parametrů nelze jednoduše teoreticky odvodit pro konkrétní obráběný materiál. Z těchto důvodů se dosud vychází z empirie získané přímo v technické praxi provozní zkušeností. Pro orientační výpočet byl navržen empirický vztah pro optimální posuvovou rychlost řezné hlavy v_{opt} v různých materiálech ve tvaru:

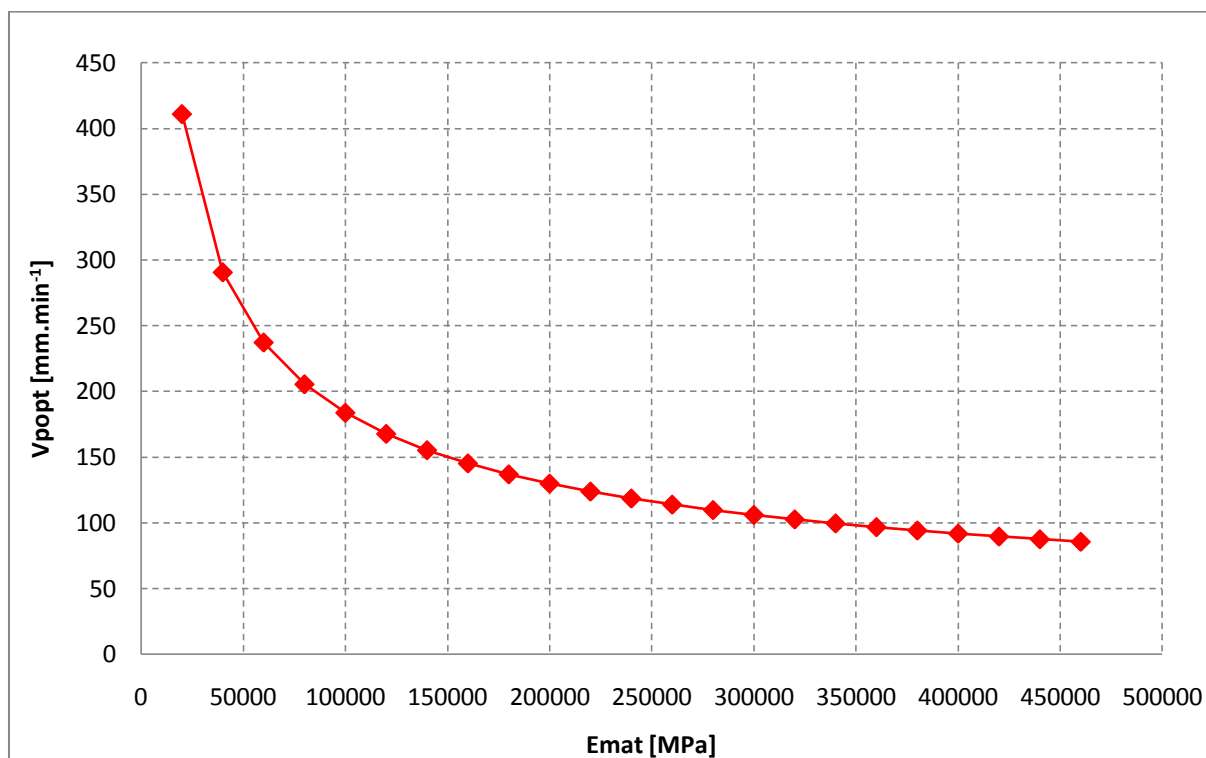
$$v_{opt} = \frac{k_1}{E_{mat}^{0,5}} \quad (5)$$

$$\text{kde: } k_1 = 0,05810 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{kg \cdot m}{s^4}}.$$

Převodní koeficient k_1 , jeho interpretace úzce souvisí s koeficienty použitého obráběného materiálu v technické praxi. Při změně nastavení posuvových rychlostí řezné hlavy dochází k plastickému jevu, creepu (tečení materiálů), což následně vede k jinému modulu pružnosti v tahu.

Vliv dalších proměnných na výslednou jakost řezu zahrnuje v sobě analytické řešení závislosti drsnosti ve stopě řezu na posuvové rychlosti $Ra = f(v_p)$. Mezi tyto proměnné patří záměna jiných mechanických vlastností materiálu a vliv hloubky řezu. V předkládané diplomové práci bude mechanický stav materiálu reprezentován modulem pružnosti v tahu E_{mat} . Rovnice (5) byla aplikována i pro další materiály

s různým modulem pružnosti v tahu. Grafické znázornění závislosti technologicky optimální rychlosti posuvu řezné hlavy na modulu pružnosti je vidět na obr. 6.19.

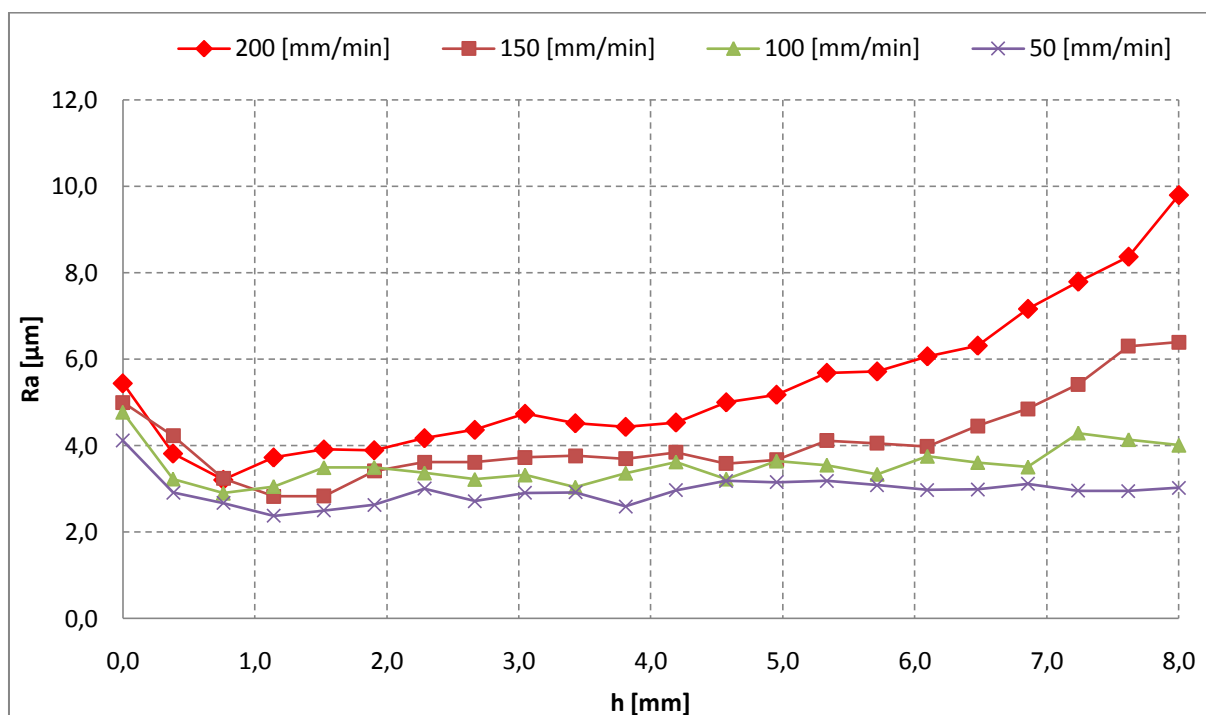


Obrázek 6.19 – Závislost technologicky optimální rychlosti posuvu řezné hlavy v_p na modulu pružnosti materiálu E_{mat} .

V okamžiku, kdy dochází k poklesu deformačního napětí a deformační síly (k poklesu pracovní schopnosti nástroje), roste drsnost povrchu. Poměrně vysokých hodnot dosahuje na počátku dělicího řezu v tzv. iniciační zóně (tj. do 1-2 mm hloubky dělicího řezu), kdy zařezání ještě tuhého nástroje do materiálu je energeticky nejnáročnější.

Měřitelnou mírou poklesu tuhosti nástroje v hydroabrazivním dělicím řezu je vedle zvyšující se drsnosti R_a i intenzita retardace stopy Y_{ret} [mm] dělicího řezu v závislosti na okamžité hloubce dělicího řezu h [mm]. Intenzita retardace stopy úzce souvisí s parametry technologie, zejména s volbou posuvné rychlosti řezné hlavy a s fyzikálně-mechanickými parametry materiálu. Data, která byla získána optickým

profilometrem MicroProf FRT na obr. 6.20 znázorňují závislost drsnosti R_a na hloubce h a na různých rychlostech posuvu řezné hlavy v_p pro ocel ČSN 17 251.



Obrázek 6.20 - Závislost drsnosti R_a na hloubce h a na různých rychlostech posuvu řezné hlavy v_p pro ocel ČSN 17 251 s iniciační zónou

Na základě měření (obr. 6.20) pomocí optického profilometru MicroProf FRT, kontaktního profilometru HOMMEL TESTER T8000 a stínové metody, byla souhrnně analyzována a interpretována za účelem teoretického popsání topografie povrchu vytvořeného technologií AWJ. Vliv iniciační zóny byl dříve zanedbáván a závislost skutečně detekované drsnosti $R_{ad} = f(h)$ byla nahrazována podle různých autorů snadněji definovatelnými funkcemi, jelikož analytické řešení topografické funkce povrchu je značně komplikované. Následně tak docházelo k idealizaci a ke zkreslení skutečně naměřené drsnosti. Proto byla odvozena reálnější aproximace pro výpočet skutečně detekované drsnosti povrchu R_{ad} podle (6) s využitím pomocné funkce závislé na deformačním napětí v radiálním směru

$$R_{rad} = f(\sigma_{def}), \text{ kde platí, že } \sigma_{def} = f(Y_{ret}, E).$$

Odvození distribuční funkce drsnosti Ra_d včetně aproximačního vyjádření náběhu drsnosti v iniciační zóně je semiempirické. Po analytické stránce vychází z předpokladu, že její konstrukce na skutečném povrchu je dána geometrickým součtem okamžitých napětově-deformačních složek dezintegrace. Použijeme-li k jejímu vyjádření vedle pomocné funkce Ra_{rad} a hloubky h např. měřitelnou hodnotu retardace dělicí stopy Y_{ret} , má odvozená topografická funkce tvar (6)

$$Ra_d = \sqrt{\left(\frac{v_p}{v_{popt}}\right)} \cdot 10^{\log \sqrt{(\log h)^2 + \left(\log \frac{1}{Y_{ret}}\right)^2 + Ra_{rad}^2}} \cdot \cos \delta^{-K_{cuto}^2} \quad (6)$$

kde pomocná topografická funkce je

$$Ra_{rad} = Ra_j \cdot 10^{\log(10^3 \cdot Ra_o \cdot Y_{ret}^{0,25} \cdot E^{-0,5})}, \quad (7)$$

$$Y_{ret} = 0,22 \cdot Ra \cdot h_{rel}, h_{rel} = \frac{h_i}{h}, i = 1 - 22 \quad (8)$$

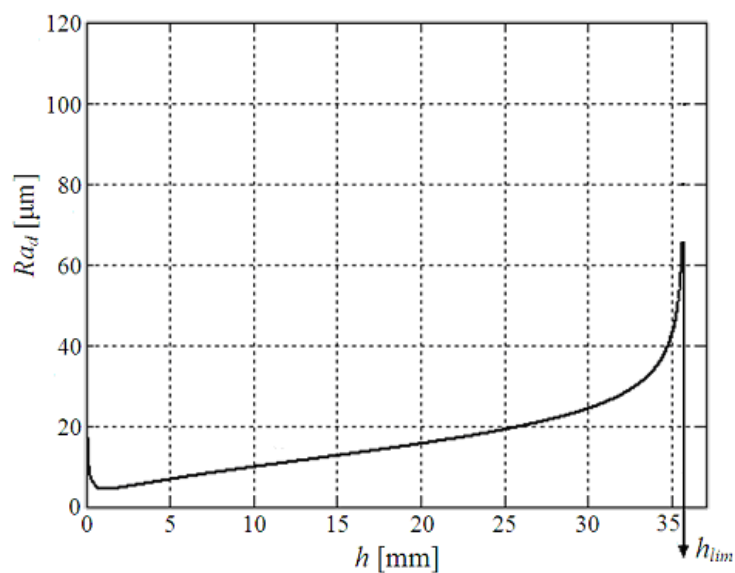
$$K_{cuto} = \frac{10^{12}}{E^2} = konst. \quad (9)$$

$$\delta = \arctg\left(\frac{Y_{ret}}{h}\right) \quad (10)$$

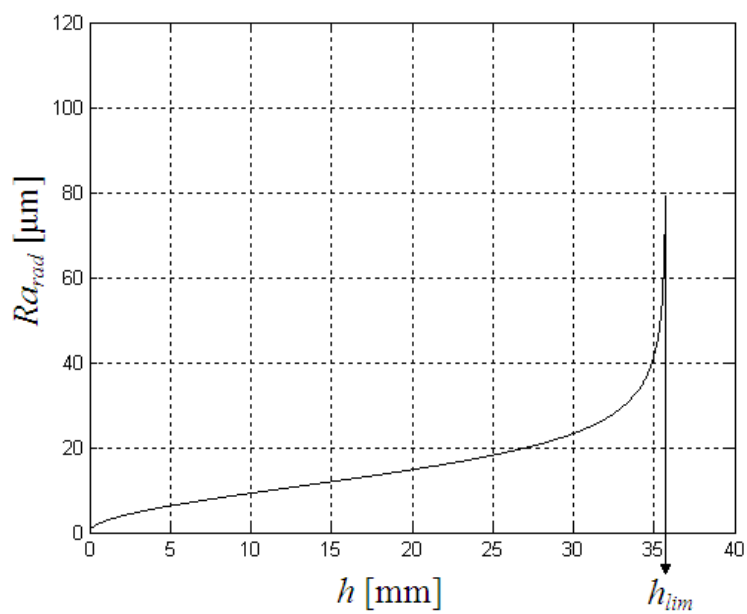
přičemž Ra_j je jednotková drsnost povrchu [μm], Ra_o je drsnost povrchu v neutrální rovině dělicího řezu.

Hodnota konstanty K_{cuto} určuje technologickou vlastnost - dělitelnost materiálu proudem AWJ (9).

Grafické vyjádření topografické funkce $Ra_d = f(h)$ podle rovnice (6) je na obr. 6.20 a pro $Ra_{rad} = f(h)$ podle rovnice (7) je na obr. 6.21.



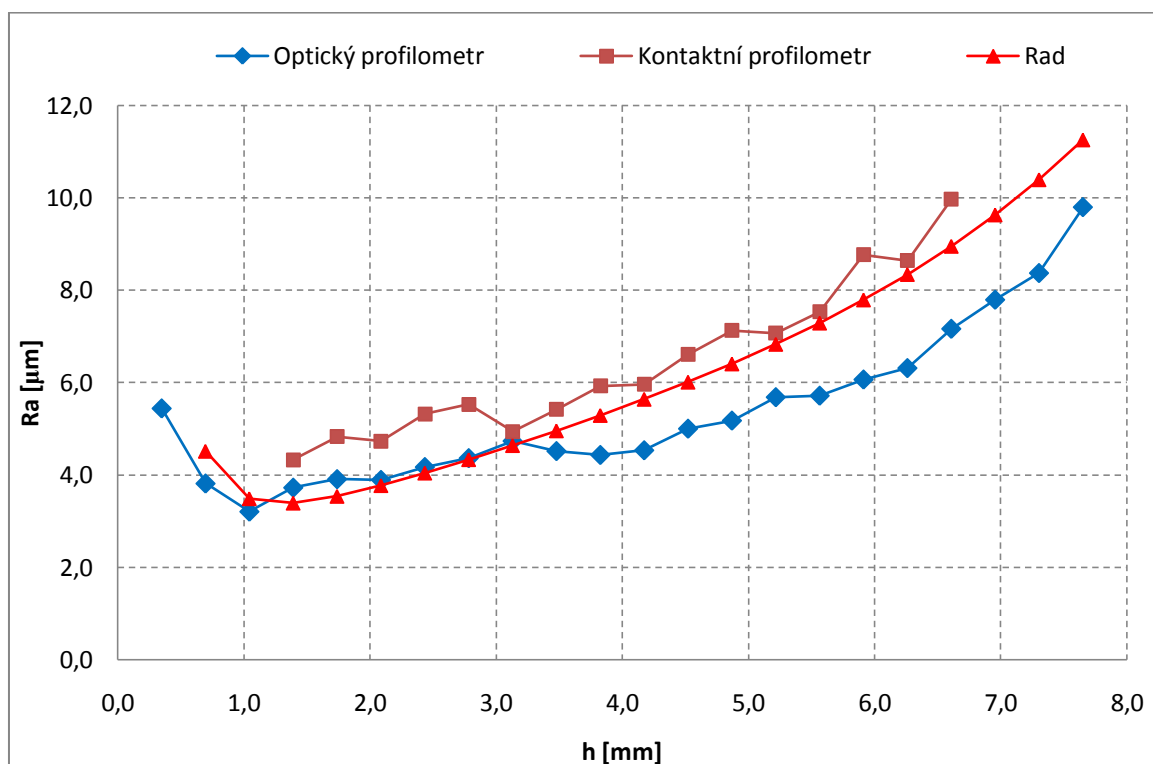
Obrázek 6.21 - Závislost Ra_d na hloubce h pro materiál ČSN 17 251



Obrázek 6.22 - Závislost Ra_{rad} na hloubce h pro materiál ČSN 17 251

Pro vzorky vytvořené podle nastavení vstupních technologických parametrů AWJ, které jsou uvedeny v tab. 6.1 platí ověřená hodnota $Ra_o = 3,7 \mu\text{m}$.

Na obr. 6.23 je graficky znázorněn typický průběh topografické funkce, kde vidíme současně komparaci predikčního teoretického průběhu a dále průběhy hodnot naměřené optickým a mechanickým profilometrem. Predikční teoretický průběh představuje na obr. 6.23 hladkou křivku odvozenou podle výše uvedeného vztahu (6). Tato komparace je provedena pro materiál ČSN 17 251, přičemž rychlost posuvu řezné hlavy $v_p = 200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, výška vzorku 8 mm, krok vzorkování 0,347 mm, počet horizontálních měřicích linií 22.



Obrázek 6.23 - Typický průběh topografických funkcí R_a na hloubce h

6.6.2 Porovnání se současným stavem

Cílem obrábění AWJ je odstranit materiál vysokou rychlostí při zachování rozumné přesnosti a kvality povrchu. Lepším pochopením mechanismu odebrání materiálu při AWJ a jeho výkonu byla značně zvýšena aplikace této erozivní metody. Autoři Zeng a Kim [36] vytvořili teoretický model pro AWJ, pomocí kterého můžeme vypočítat posuvnou rychlost řezné hlavy:

$$v_p = \left(\frac{N_m \cdot p^{n_1} \cdot m_v^{n_2} \cdot m_a^{n_3}}{C \cdot q \cdot h \cdot d_a^{n_4}} \right)^{1,15}, \quad (11)$$

kde N_m je obrobitelnost materiálu určená experimentálně. Konstanta C je měřítko přiřazené parametru N_m . Exponenty n_1 , n_2 , n_3 , n_4 a konstanty C a N_m jsou z literatury [36].

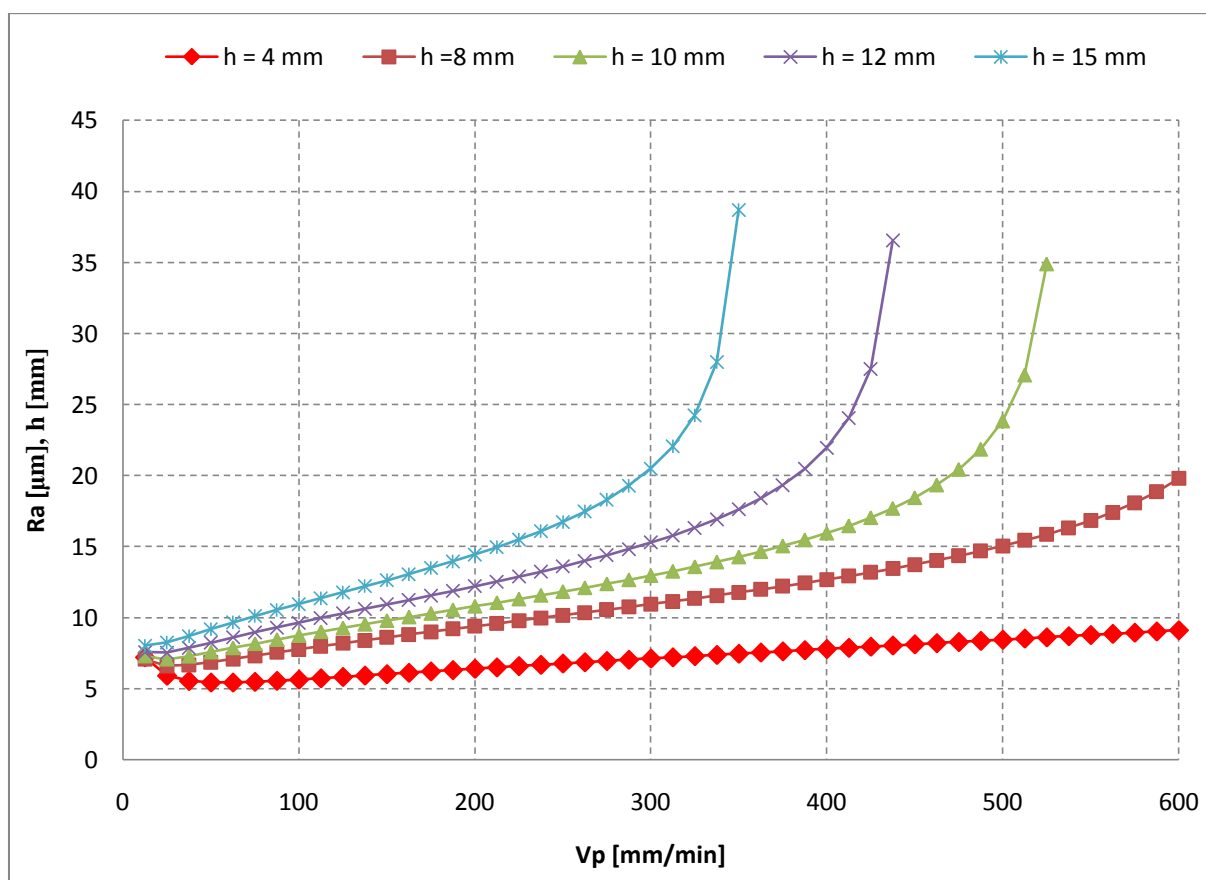
Jedním z parametrů potřebných k výpočtu je stupeň kvality q , který vyjadřuje kvalitativní stav požadovaného povrchu v rozsahu 1 až 5, kdy 1. stupeň představuje nejhorší kvalitu řezné stěny a stupeň 5. naopak nejlepší kvalitu řezné stěny. Toto hodnocení je však pro strojírenskou praxi značně nedostačující.

Výše uvedený vzorec (11) od autorů Zeng a Kim je příliš složitý pro výpočet. Tento problém se objevil i u autorů Hashish a Hlaváč v literatuře [9], [10]. Pomocí rovnice (11) byla vypočítána posuvová rychlost pro materiál 17 251 při vstupních technologických parametrech uvedených v tabulce 6.1 a to pro všechny uvedené stupně kvality (1. až 5. stupeň kvality řezné stěny). Dále byla v tabulce 6.3 provedena komparace rychlosti řezné hlavy mezi rychlostí v_{pKZ} vypočítanou dle vztahu (11) od autorů Kim a Zeng a navrhovanou rychlostí řezné hlavy v_p ve vztahu ke kvantitativnímu parametru drsnosti R_a , což je nový prvek pro dimenzování technologie AWJ i s určením přesnější kvality povrchu.

Tabulka 6.3 – Komparace stupňů kvality s drsností povrchu při různé posuvné rychlosti

Stupeň kvality q	Posuvná rychlost v_{pKZ} [mm·min ⁻¹]	Posuvná rychlost v_p [mm·min ⁻¹]	Drsnost povrchu R_a [μm]
1	573	524	20 a více
2	258	236	8 – 20
3	162	148	4 – 8
4	116	105	2 – 4
5	90	81	1 – 2

Na obr. 6.24 je graficky prezentována optimální posuvová rychlost řezné hlavy v_p odvozenou topografickou funkcí (6) pro různé hloubky obráběného materiálu. Na obr. 6.24 vidíme, jak se vzrůstající posuvovou rychlostí roste drsnost R_a při zvyšujících se tloušťkách materiálu a dosažení limitní hloubky pro danou posuvnou rychlosti. Pokud se zvětšuje hloubka řezaného materiálu, snižuje se maximální možná posuvová rychlost řezné hlavy. Při dalším snižování rychlosti klesá drsnost povrchu podle křivek na obr. 6.23. Pro hloubku vzorků 4 mm a 8 mm z grafu vyplývá, že pro dělicí řez je možno použít teoretickou rychlost posuvu řezné hlavy $600 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Zatímco hloubek 10 mm, 12 mm a 15 mm lze dosáhnout jen snížením rychlostí až na hodnoty $520 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, $430 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a $350 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Se zkracováním dosažitelné hloubky úměrně roste drsnost R_a dělicích stěn.



Obrázek 6.24 – Distribuce drsnosti R_{a_d} v různých hloubkách podle posuvné rychlosti v_p

7 Závěr

V úvodu diplomové práce je prezentován současný stav technologie vodního abrazivního paprsku, kde je blíže popsán vznik nástroje, jeho formování a působení na obráběný materiál. Jsou zde zmíněny i vývojové trendy této nekonvenční technologie úběru materiálu.

Specifická topografie povrchů vytvořených technologií AWJ byla analyzována metodami pro měření struktury povrchu. V úvodní části byl proveden rozbor těchto metod hodnocení topografie povrchu s uvedením jednotlivých výhod a nevýhod. Jako přednostně vhodná pro aplikace měření povrchů vytvořených abrazivním vodním paprskem byla použita stínová metoda. Pro následnou konfrontaci získaných výsledků pomocí této metody bylo využito optického profilometru FRT a kontaktního profilometru HOMMEL TESTER T8000. Z tohoto kroku byly získány přepočtové vztahy mezi RMS a normovanými parametry. Dále je v předkládané práci provedena komparace drsnosti povrchu ve vztahu k posuvové rychlosti a je zde navržen způsob určení technologicky optimální rychlosti pro daný typ materiálu (5), pomocí odvozené topografické funkce (6). Hodnoty získané podle vzorce (6) jsou dále porovnány s predikčními hodnotami vypočítanými dle vzorce (11) od autorů Kim a Zeng.

Vhodná volba technologicky optimální rychlosti posuvu řezné hlavy při obrábění různých druhů materiálů je důležitá pro dodržení požadované výsledné drsnosti řezných stěn a požadované hloubky řezů při zachování vysoké produktivity práce čímž přispívá k úspoře pracovního času a materiálu. Pro zvýšení konkurence schopnosti technologie AWJ je snaha zavést automatizaci procesu obrábění. Návrh topografické funkce přispívá k softwarovému vývoji této nekonvenční metody obrábění a měl by sloužit k nadimenzování technologie právě tak, aby se zamezilo nutnosti dalšího opracování materiálu.

Seznam použitých pramenů

- [1] BILÍK, O. *Obrábění I – 2. díl*. Ostrava, VŠB-TUO Ostrava, 2001, 136 s. ISBN 80-248-0033-0.
- [2] BLAGODARNY, V. – KMEC, J. – HLOCH, S.: Supersonic hydroabrasive erosion, Zborník tretej medzinárodnej vedecko-technickej konferencie: Balttechmaš – 2002, str. 24-28
- [3] BOUŠKA, V., KAŠPAR, P. *Speciální optické metody*. Praha: Academia, 1983, 198 s.
- [4] BREZINA, I. Drsnosti povrchu – význam kvantifikácie drsnosti - metrologické aspekty - vývojové tendencie. *Jemná mechanika a optika*, 1991, č. 7. ISSN 0009-0700.
- [5] BUMBÁLEK, B., ODVODY, V., OŠTÁDAL, B.: *Drsnost povrchu*. Praha, SNTL 1989
- [6] ČSN EN ISO 4287
- [7] ČSN EN ISO 4288
- [8] FOLDYNA, J., SITEK, L., JEKL, P., ŠVEHLA, B. Measurement of dynamic pressure and force effect of modulated water jet. *Proc. of the 7th Pacific Rim Int. Conf. on Water Jetting Technology*, Jeju 2003, Chung-In Lee, Seokwon Jeon, Jae-Joon Song (eds), Korean Society of Water Jet Technology, 2003, p. 125-132. ISBN 89-95026-6-2 93550.
- [9] HASHISH, M. *A model study of metal cutting with abrasive water jet*. ASME Journal of Engineering Materials and Technology, 1984, p. 88-100. ISSN 0094-4289.
- [10] HLAVÁČ, L.: *Model pro řízení parametrů kapalinového paprsku při porušování materiálů v pevné fázi: doktorská disertační práce*. Ostrava, 2000
- [11] HLAVÁČEK, P. *Měření distribuce výškových a podélných fluktuací povrchu kovových materiálů vytvořených abrazivním vodním paprskem a jejich analýza: bakalářská práce*. FS VŠB-TUO, Ostrava, 2007, 55 s.
- [12] HLOCH, S. *Vplyv procesných parametrov vysokorýchlostného hydroabrazívneho prúdu na kvalitu obrobenej plochy: dizertačná práca*. Prešov: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, 2004, 138 s., 6 pril.

- [13] HLOCH, S., GOMBÁR, M.: Drsnosť povrchu nehrdzavejúcej ocele pri delení vysokorýchlostným hydroabrazívnym prúdom. In: MM. Průmyslové spektrum. no. 7,8 (2006), p. 48-50. ISSN 1212-2572. Praha, Česká republika.
- [14] HLOCH, S., VALÍČEK, J.: *Vplyv faktorov na topografiu povrchov vytvorených hydroabrazívnym delením*, Prešov: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií, 2008, 125 s. ISBN 978-80-553-0091-7
- [15] HLOCH, S., VALÍČEK, J., GOMBÁR, M., FABIAN, S. Analýza hlučnosti pri delení nehrdzavejúcej ocele pri delení vysokorýchlostným hydroabrazívnym prúdom. *Elektrotechnika v praxi*, 2007, roč. 17, č. 3-4, s. 182-185. ISSN 0862-9730.
- [16] HLOCH, S., VALÍČEK, J., RADVANSKÁ, A. Noise evaluation at abrasive waterjet cutting of materials by means of factor analysis. *Nonconventional Technologies Review*, 2007B, no. 4. ISSN 1454-3087.
- [17] KLICH, J. *Analýza a komparace drsnosti povrchu vytvořených abrazivním vodním paprskem z hlediska různých postupových rychlostí: bakalářská práce*. Ostrava: FS VŠB-TU, 2007, 37 s
- [18] KLICHOVÁ, D. *Měření drsnosti povrchů kovových materiálů vytvořených abrazivním vodním paprskem, jejich klasifikace podle dosahované drsnosti a navržení databáze vzhledem k vytypovaným technologickým parametrům: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB-TUO, Ostrava, 2007, 39 s.
- [19] KRAJNÝ, Z.: *Vodný lúč v praxi*. Bratislava: Miroslav Mračko. 1998, 384 s. ISBN 80-8057-091-4
- [20] MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technológie*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [21] MARTINEC, P., FOLDYNA, J., SITEK, L., ŠČUČKA, J., VAŠEK, J. *Abrasives for AWJ cutting*. Ostrava: Academy of Sciences, 2002, 80 s.
- [22] PERNIKÁŘ, J., TYKAL, M., VAČKÁŘ J.: *Jakost a metrologie, Část: Metrologie*, CERM, Brno, 2001, 151 s., ISBN 80-214-1997-0
- [23] SHAVLOVSKY, D. S. Hydrodynamics of High Pressure Fine Continuous Jets. In: Brock, T. E., Richardson, A. (eds.) 1972 Proceedings of the 1st International Symposium of Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, pp.A6-A81.

- [24] SITEK, L. *Analýza procesu rozpojování hornin vysokorychlostními vodními paprsky na základě laboratorních měření : doktorská disertační práce*. Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2000, 110 s., 3 příl.
- [25] TICHÁ, Š.: *Strojírenská metrologie část 1*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 112 s. ISBN 80-248-0672-X.
- [26] VALÍČEK, J. Některé závěry z analýz dezintegrace materiálu v pevné fázi vodním a abrazivním vodním paprskem. In *METAL 2005, 14. mez. Metal. Konference 23.- 26. 5. 2005*, Hradec nad Moravicí, Česká republika [CD-ROM], Ostrava : Tanger, s.r.o., 2005A, s. 1-6. ISBN 80-86840-18-2.
- [27] VALÍČEK, J.: *Snímání kvality povrchu materiálu pro řízení technologie kapalinového paprsku: doktorská práce*. Ostrava: VŠB-TUO, Institut fyziky, 2003, 92 s.
- [28] VALÍČEK, J. *Měření a řízení jakosti povrchu při hydroabrazivním dělení materiálu: habilitační práce*, Institut fyziky HGF VŠB-TUO, Ostrava, 2003.
- [29] VALÍČEK, J., DRŽÍK, M., HLOCH, S., OHLÍDAL, M., LUPTÁK, M., GOMBÁR, M., RADVANSKÁ, A., HLAVÁČEK, P., PALENÍKOVÁ, K. Experimental analysis of irregularities of metallic surfaces generated by abrasive water jet. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, Elsevier, 2007A, p. 1786-1790. ISSN 0890-6955.
- [30] VALÍČEK, J., DRŽÍK, M., OHLÍDAL, M., MÁDR, V., HLAVÁČ, L., M., Optical method for surface analyses and their utilization for abrasive liquid jet automation. In: *Proc. of the 2001 WJTA American Waterjet Conference*, M. Hashish (ed.), WJTA, Minneapolis, Minnesota, pp. 1–11, 2001.
- [31] VALÍČEK, J.; HLOCH, S. *Měření a snímání kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. Ostrava: VŠB-TUO 2008, 127 s. ISBN 978-80-254-3588-5
- [32] VASILKO, K., KMEC, J.: *Delenie materiálu: Teória a technológia*. Prešov: DATAPRES, 2003. 232 s. ISBN 80-7099-903-9
- [33] VAŠEK, J., FOLDYNA, J. Abrasive Water jet Cutting of hard Rocks. In *Proc. Of the 10th Int. Conf. on Jet Cutting Technology*, Amsterdam, 1990, p. 423-424.
- [34] VAŠEK, J., MARTINEC, P., FOLDYNA, J., SITEK, L., ŠČUČKA, J.: *Abrasives for AWJ cutting*. Academy of Sciences, Ostrava, 2002

- [35] [20. dubna 2008, 15:00]. Dostupné na WWW:
<<http://www.flowcorp.com/waterjet-resources.cfm?id=344>>
- [36] ZENG, J., KIM, T. J. Parameter prediction and cost analysis in abrasive waterjet cutting operations. *Proc. 7th American water jet conference*, U.S.A: Washington, August 28-31, 1993, p. 175-189. ISBN 1-880342-02-2

Publikace autora související s danou problematikou

- [1] VALÍČEK, J., HLOCH, S., GOMBÁR, M., ČEP, R., HLAVÁČEK, P., KLICHOVÁ, D., KLICH, J., PLAČEK, M.: Aplikace bezkontaktní optické metodiky měření a interpretace získaných výsledků. In *Metal 2007, Hradec nad Moravicí, květen 2007*, CD sborník přednášek – přednáška číslo 181, TANGER s.r.o., Ostrava, 2007, ISBN 978-80-86840-33-8

- [2] KLICH, J., KLICHOVÁ, D., VALÍČEK, J., ČEP, R.: Analýza povrchů kovových materiálů vytvořených abrazivním vodním paprskem, návržení databáze vzhledem k vytipovaným technologickým parametrům, komparace z hlediska různých postupových rychlostí. In: *Najnovšie trendy v poľnohospodárstve, v potravinárstve a v odpadovom hospodárstve. Zborník z medzinárodnej študentskej vedeckej konferencie ŠVOČ 2007*. Nitra: SPU. 2007. s. 73 – 78. ISBN 978-80-8069-878-2

- [3] KLICH, J. *Analýza a komparace drsnosti povrchu vytvořených abrazivním vodním paprskem z hlediska různých postupových rychlostí: bakalářská práce*. Ostrava: FS VŠB-TU, 2007, 37 s